

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COECI – COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

TÁSSIA MAYARA FOCESATO

**CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO: INFLUÊNCIA DO  
MODO DE RESFRIAMENTO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
APÓS EXPOSIÇÃO A ELEVADAS TEMPERATURAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2020

TÁSSIA MAYARA FOCESATO

**CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO: INFLUÊNCIA DO  
MODO DE RESFRIAMENTO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
APÓS EXPOSIÇÃO A ELEVADAS TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
como requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino  
Balestra.

TOLEDO

2020



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 239

### **Concreto reforçado com fibras de aço: influência do modo de resfriamento na resistência à compressão após exposição a elevadas temperaturas**

por

**Tássia Mayara Fochesato**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 10:30 h do dia **08 de Julho de 2020** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

---

Profº Dr. Gustavo Savaris  
(UTFPR – TD)

---

Profº Dr. Lucas Boabaid Ibrahim  
(UTFPR – TD)

---

Prof Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra  
(UTFPR – TD)  
Orientador

Visto da Coordenação  
Prof. Dr. Gustavo Savaris  
Coordenador da COECI

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus, primeiramente, por ter me proporcionado chegar até aqui e por me auxiliar durante toda esta caminhada.

Agradeço aos meus pais, Ademir Fochesato e Marli Zimmermann Fochesato, por todo apoio, suporte e paciência. Agradeço também a minha irmã, Michele Fochesato, e ao meu namorado, Lafayette Baesso, por terem sido meu refúgio nos momentos difíceis.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e a todos os professores, servidores e colaboradores que de alguma forma contribuíram para minha formação acadêmica.

Agradeço em especial ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra por toda orientação e contribuição a este trabalho.

Agradeço aos professores Prof. Dr. Gustavo Savaris, ao Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim e a Prof. Deldina Baesso por todas as valiosas considerações.

Agradeço à Universidade Paranaense (UNIPAR) por disponibilizar espaço e recursos fundamentais para a execução do meu trabalho.

Agradeço aos laboratoristas Marcos Vinicius Schlichting e Wilson Leobet, da UTFPR, e ao laboratorista Alex Eduard Minga, da UNIPAR, pelas instruções e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também aos laboratoristas do Laboratório de Química da UTFPR pelo empréstimo de material para a realização dos ensaios.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

FOCHESATO, Tássia Mayara. **Concreto reforçado com fibras de aço: influência do modo de resfriamento na resistência à compressão após exposição a elevadas temperaturas.** 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2020.

O concreto é o material construtivo mais consumido no Brasil e no mundo em decorrência de suas propriedades nos estados fresco e endurecido, além de apresentar grande versatilidade. Entretanto, este material apresenta algumas limitações como, por exemplo, o modo de ruptura do tipo frágil. Devido a isso, surgiram alternativas tecnológicas para suprir essas limitações. Uma opção é o concreto reforçado com fibra de aço (CRFA). No Brasil, este tipo de concreto é amplamente utilizado em pavimentos, concreto projetado e pré-fabricados. Porém, ainda não há uma completa regulamentação para este material. Falta ainda, por exemplo, uma norma acerca do CRFA em situações de incêndio. O rápido aquecimento ocasionado por um incêndio, seguido de um resfriamento, pode comprometer seriamente uma estrutura de concreto. Em virtude disso, analisa-se nesta pesquisa a influência do modo de resfriamento na resistência à compressão do concreto reforçado com fibra aço após exposição a elevadas temperaturas. Para tanto, moldou-se 66 corpos de prova cilíndricos com cinco centímetros de diâmetro e 10 centímetros de altura. Utilizou-se um traço na proporção de 1:1,53:2,12:0,56 (Cimento CP II-F-32, areia fina, agregado graúdo basáltico e água). A proporção de fibra de aço foi de 1% em relação ao volume de concreto. As amostras foram submetidas a cinco diferentes temperaturas (200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C e 1000 °C) por sete horas. Após esta etapa, os corpos de prova foram resfriados sob dois regimes: lento e brusco. Os resultados mostraram que até 400 °C, o tipo de resfriamento exerce maior influência do que nas temperaturas acima de 400 °C. A partir de 600 °C os resultados se tornam muito próximos; nesta temperatura, em específico, as resistências residuais foram de 76,35% e 77,72% para o resfriamento lento e brusco, respectivamente. Para as temperaturas de 800 °C e 1000 °C, os resultados confirmaram a decomposição dos constituintes do concreto. A consequência para tal fato foi uma drástica redução na resistência à compressão.

**Palavras-chave:** Concreto. Fibra de aço. Resistência à compressão. Elevadas temperaturas. Resfriamento.

## ABSTRACT

FOCHESATO, Tássia Mayara. **Steel fiber reinforced concrete: influence of cooling mode on compressive strength after exposure to high temperatures.** 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2020.

Concrete is the most consumed construction material in Brazil and the world due to its properties in the fresh and hardened states, in addition to presenting great versatility. However, this material has some limitations, such as the fragile rupture mode. Because of this, technological alternatives have emerged to overcome these limitations. One option is steel fiber reinforced concrete (CRFA). In Brazil, this type of concrete is widely used in pavements, shotcrete and prefabricated concrete. However, there is still no complete regulation for this material. There is still a lack, for example, of a standard on CRFA in fire situations. The rapid heating caused by fire, followed by cooling, can seriously compromise a concrete structure. As a result, this research analyzes the influence of the cooling mode on the compressive strength of concrete reinforced with steel fiber after exposure to high temperatures. For this purpose, 66 cylindrical specimens with five centimeters in diameter and 10 centimeters in height were molded. A ratio of 1: 1.53: 2.12: 0.56 was used (Cement CP II-F-32, fine sand, coarse basaltic aggregate and water). The proportion of steel fiber was 1% concerning the volume of concrete. The samples were subjected to five different temperatures (200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C and 1000 °C) for seven hours. After this stage, the specimens were cooled under two regimes: slow and abrupt. The results showed that up to 400 °C, the type of cooling has a greater influence than at temperatures above 400 °C. From 600 °C the results become very close; at this temperature, in particular, the residual resistances were 76.35% and 77.72% for slow and sudden cooling, respectively. For temperatures of 800 °C and 1000 °C, the results confirmed the decomposition of the concrete constituents. The consequence of this was a drastic reduction in compressive strength.

**Keywords:** Concrete. Steel fiber. Compressive strength. High temperatures. Cooling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação da resistência do concreto (a) e do aço (b) em função do aumento de temperatura. ....	15
Figura 2 – Termogravimetria e termogravimetria derivada do concreto.....	15
Figura 3 – Resistência à compressão do concreto em função da temperatura. ....	16
Figura 4 – Resistência à compressão residual do concreto com o aumento de temperatura. ...	16
Figura 5 – Influência da temperatura na resistência à compressão residual do concreto para cada modo de resfriamento. ....	17
Figura 6 – Curvas tensão-deformação após 56 dias de resfriamento. ....	18
Figura 7 – Resultado do ensaio de cisalhamento para cada proporção de fibra de aço em função do aumento de temperatura. ....	19
Figura 8 – <i>Spalling</i> nas diferentes temperaturas para cada composição de concreto.....	20
Figura 9 – Esquema do aparelho de compressão de alta temperatura. ....	21
Figura 10 – Curvas tensão-deformação do concreto sem (a) e com 1% (b) e 2% (c) de fibra de aço após exposição a diferentes temperaturas. ....	22
Figura 11 – Corpos de prova expostas ao fogo, à esquerda, e medição da temperatura, à direita. ....	23
Figura 12 – Fibras de polipropileno (a), fibras de aço Dramix 3D (b) e Dramix 5D (c). ....	24
Figura 13 – Curvas tensão-deformação para cada composição do concreto com fibra de aço nas diferentes temperaturas de exposição. ....	25
Figura 14 – Influência da dosagem das fibras na resistência à compressão para cada temperatura. ....	26
Figura 15 – <i>Spalling</i> para cada tipo de concreto, sendo: C referente ao concreto de referência; PP à adição de fibra de polipropileno e ST à fibra de aço.....	27
Figura 16 – Materiais utilizados para produção do concreto.....	28
Figura 17 - (a) Materiais secos misturados; (b) Concreto com fibra de aço em estado fresco.	31
Figura 18 - Corpos de prova, separados em grupos, após desmoldagem.....	32
Figura 19 - Corpos de prova em solução saturada de hidróxido de cálcio para cura. ....	32
Figura 20 – Corpo de prova sendo retificado para nivelamento da superfície. ....	33
Figura 21 – (a) Forno Mufla MARQLABOR MAQMUF2-RP; (b) Corpos de prova expostos a 1000 °C.....	34
Figura 22 – Taxa de aquecimento do forno mufla em °C/min. ....	34

Figura 23 - Corpo de prova sendo submerso em água corrente para resfriamento brusco após exposição a 1000 °C. ....	35
Figura 24 - Corpos de prova no início do ensaio de resfriamento. Grupo G9 à esquerda e grupo G10 à direita. ....	36
Figura 25 – Prensa de Compressão EMIC DL30000N. ....	36
Figura 26 – Corpos de prova após serem resfriados naturalmente, à esquerda, e bruscamente, à direita. ....	38
Figura 27 – Resistência à compressão relativa para cada modo de resfriamento após exposição a 1000 °C para CRFA. ....	39
Figura 28 - Variação média da temperatura superficial dos corpos de prova para cada temperatura de exposição. ....	41
Figura 29 – Valores médios de resistência à compressão residual do grupo de referência e dos grupos submetidos ao resfriamento lento e brusco. ....	44
Figura 30 - Gráfico de resíduos para análise de Outliers. ....	45
Figura 31 - Resistência à compressão média, em MPa, para todos os grupos de estudo, após retirada de Outlier. ....	47
Figura 32 - Resistência à compressão média, em porcentagem, do concreto com fibra de aço, após retirada de Outlier em comparação ao concreto convencional dos estudos de Segalin (2018). ....	48
Figura 33 - Concreto reforçado com fibra de aço após ensaio de resfriamento. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8, G9 e G10. ....	50
Figura 34 - (a) CRFA após exposição a 800 °C e resfriado bruscamente ao lado de CRFA não submetido ao aquecimento; (b) concreto convencional após resfriamento brusco e exposição a 800 °C. ....	51
Figura 35 - (a) CRFA após resfriamento brusco e exposição a 1000 °C ao lado de CRFA não submetido ao aquecimento; (b) e (c) concreto convencional após resfriamento brusco e exposição a 1000 °C ....	52



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistência à compressão residual para cada modo de resfriamento em cada temperatura analisada. ....	18
Tabela 2 – Tensão máxima e tensão de ruptura do concreto com e sem adição de fibras antes e após exposição ao fogo. ....	23
Tabela 3 - Redução na resistência à compressão em porcentagem para o concreto com diferentes quantidades de fibras do tipo 3D e 5D, após exposição à 500 °C. ....	25
Tabela 4 – Ensaio de massa específica e caracterização dos materiais. ....	30
Tabela 5 – Grupos de corpos de prova separados por temperatura e modo de resfriamento. ...	30
Tabela 6 – Quantidade de cada material para a produção de 78 corpos de prova de CRFA. ....	30
Tabela 7 – Taxa de aquecimento média do forno mufla para cada temperatura. ....	35
Tabela 8 – Resistência à compressão do concreto sem e com fibra de aço após exposição a 1000 °C. ....	39
Tabela 9 - Temperatura da água, em cada dia, para o ensaio de resfriamento brusco. ....	40
Tabela 10 - Temperatura superficial de cada corpo de prova após resfriamento brusco. ....	40
Tabela 11 - Gradientes de temperatura imediatamente após resfriamento brusco. ....	42
Tabela 12 - Fator de correção h/d. ....	42
Tabela 13 - Altura dos corpos de prova. ....	42
Tabela 14 - Relação h/d para cada corpo de prova. ....	43
Tabela 15 - Resistência à compressão do grupo de referência. ....	43
Tabela 16 - Resistência à compressão dos grupos referentes ao resfriamento natural. ....	43
Tabela 17 - Resistência à compressão dos grupos referentes ao resfriamento brusco. ....	44
Tabela 18 - Resistência à compressão do grupo de referência após retirada de Outlier. ....	45
Tabela 19 - ANOVA para resistências à compressão residuais do resfriamento natural. ....	45
Tabela 20 - ANOVA para resistências à compressão residuais do resfriamento brusco. ....	46
Tabela 21 - Teste de Tukey para o grupo de referência G0 e para os grupos referentes ao resfriamento lento. ....	46
Tabela 22 - Teste de Tukey para o grupo de referência G0 e para os grupos referentes ao resfriamento brusco. ....	47

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	11
1.1	JUSTIFICATIVA	12
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	14
2.1	EFEITOS DA ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO	14
2.2	ESTADO DA ARTE SOBRE CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS SUBMETIDOS A ELEVADAS TEMPERATURAS	21
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	28
3.1	MATERIAIS	28
3.2	MÉTODOS	28
3.2.1	Determinação do traço	28
3.2.2	Produção dos corpos de prova	30
3.2.3	Taxa de aquecimento, exposição a elevadas temperaturas e modo de resfriamento	33
3.2.4	Ensaio de resistência à compressão axial	36
3.2.5	Análise dos dados	37
3.2.6	Ensaio preliminares	38
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	40
4.1	GRADIENTES DE TEMPERATURA NO RESFRIAMENTO BRUSCO	40
4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	42
4.2.1	Tratamento estatístico	44
4.2.2	Discussão dos resultados	47
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	53
5.1	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	53

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	54
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>55</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Segundo a NBR 12655 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento (ABNT, 2015c), o concreto é definido como sendo um material obtido a partir da “mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem incorporação de componentes minoritários” (adições e/ou aditivos), que desenvolve suas propriedades a partir do endurecimento da pasta de cimento. O concreto é o principal produto da engenharia civil, pois é o material construtivo mais utilizado no Brasil e no mundo. De acordo com Lascarro (2017), no ano de 2014, 104 milhões de metros cúbicos de concreto foram produzidos nas concreteiras da América Latina. Esse elevado consumo justifica-se por uma série de vantagens apresentadas por este material, tais como: resistência à água e custo reduzido, além de propiciar, em estado fresco, inúmeras variações de forma para a moldagem de elementos estruturais ou arquitetônicos (PEDROSO, 2009).

No entanto, o concreto possui algumas limitações, como por exemplo a baixa relação resistência/peso. Além disso, o modo de ruptura do concreto convencional é do tipo frágil, isto é, quando submetido a esforços de tração, a falha do material ocorre sob níveis de deformação considerados pequenos. Devido a isso, surgiram alternativas tecnológicas de modo a compensar essas limitações, como o concreto armado e o concreto reforçado com fibras (CRF) (FIGUEIREDO, 2011). No que se refere às fibras, o mercado dispõe de fibras de polipropileno, de carbono e de aço, com diferentes tamanhos e geometrias. A NBR 15530 – Fibras de aço para concreto – Especificações (ABNT, 2007) define as fibras de aço como sendo “filamentos de aço descontínuos produzidos especificamente para o uso em concreto”.

No Brasil, atualmente, as aplicações desse material concentram-se, principalmente, na construção de pavimentos, utilização em concreto projetado e pré-fabricados. Nos países da Europa e nos Estados Unidos, há uma menor demanda de obras de infraestrutura, logo, as pesquisas nestes países concentram-se em aplicações mais sofisticadas, como, por exemplo, o uso de CRF em lajes suspensas de edifícios (FIGUEIREDO, 2011). Além disso, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de viabilizar sua aplicação em vigas e pilares e, até mesmo, em substituir, total ou parcialmente, as armaduras em segmentos de túneis em decorrência da melhora na eficiência de produção, competitividade econômica e melhor desempenho quanto à corrosão (SERAFINI et al., 2019).

As fibras para reforço do concreto têm por objetivo melhorar as propriedades da matriz cimentícia o que, dependendo do tipo e teor de fibra, pode incluir melhorias na resistência à tração ou flexão, ductilidade, tenacidade e resistência ao impacto, por exemplo (JOHNSTON, 2010, p. 2). De acordo com Liang et al. (2018), no que se refere a situações de incêndio, as

fibras de aço podem reduzir a probabilidade e a intensidade do fenômeno conhecido como *spalling*, ou lascamento superficial, resultante do estresse térmico causado na estrutura.

Alguns casos de incêndio em estruturas merecem destaque devido às suas magnitudes. Em 1974, na cidade de São Paulo, às 8h50min do dia 1º de fevereiro, ocorreu um incêndio no edifício Joelma, que durou cerca de 1h30min. Uma falha na instalação de um ar-condicionado no 12º pavimento do prédio ocasionou um curto-circuito. O incêndio deixou 187 mortos e mais de 300 feridos (BATISTA, 2018). Cerca de 44 anos depois deste desastre, outro grande incêndio, seguido de desabamento, também ocorreu em São Paulo. No centro da capital, o edifício Wilton Paes de Almeida, com 11.083 m<sup>2</sup> de área construída e 24 andares, era a morada de cerca de mais de 300 pessoas, em situação irregular. Destas, sete pessoas morreram, e uma foi dada como desaparecida (MURARO, 2018).

A partir de tragédias, como a do edifício Joelma, surgiram decretos, normas e instruções técnicas com o objetivo de regulamentar as estruturas a respeito da segurança em situações de incêndio. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) elaborou diversas normas, como a ABNT NBR 15200 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio, contudo não há, ainda, uma norma técnica específica para concretos com fibras de aço em situação de incêndio.

Mediante o exposto, o presente trabalho visa contribuir no âmbito de avaliar os efeitos de elevadas temperaturas sobre a resistência à compressão de concretos reforçados com fibras de aço (CRFA) submetidos a diferentes modos de resfriamento.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

As edificações na construção civil estão sujeitas a situações de incêndio conforme abordado anteriormente. Neste caso, em geral, a duração dos incêndios ultrapassa horas, e sua extinção se dá quando todo material combustível é consumido (resfriamento natural), ou por meio do lançamento de água e/ou produtos químicos (resfriamento brusco). Nesse ponto, a estrutura de concreto está submetida a elevadas temperaturas por longo período de tempo, seguida de um modo de resfriamento que afeta suas propriedades mecânicas. Dessa forma, a compreensão dos efeitos combinados de exposição e resfriamento nas propriedades do concreto é importante na avaliação da capacidade de carga remanescente de uma estrutura após o incêndio.

Na literatura, ainda são poucos os trabalhos que tratam desses efeitos em concretos convencionais reforçados com fibras. Logo, o presente trabalho visa contribuir nesta vertente, buscando fornecer subsídios a respeito da capacidade de carga remanescente de estruturas de concreto reforçadas com fibras metálicas, após exposição a elevadas temperaturas.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a influência do modo de resfriamento na resistência à compressão de corpos de prova de concreto reforçados com fibra de aço, após exposição à elevadas temperaturas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Verificar as alterações na resistência à compressão em concretos reforçados com fibras, submetidos a temperaturas de 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C e 1000 °C;
- Analisar os efeitos de diferentes modos de resfriamento (brusco e natural) na resistência à compressão de concretos reforçados com fibras de aço, após exposição à elevadas temperaturas;
- Comparar os resultados obtidos com a literatura de referência.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 EFEITOS DA ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

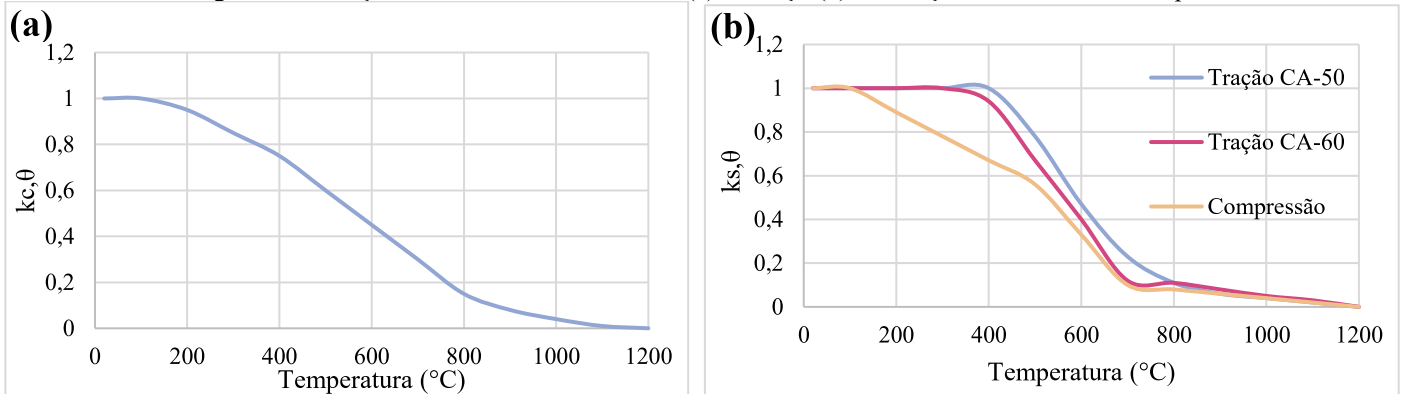
A matriz cimentícia do concreto, quando exposta à elevadas temperaturas, sofre alterações químicas devido à decomposição de seus constituintes e à evaporação da água. A água, ao evaporar no interior dos poros do concreto, exerce pressões que levam a microfissuração. Fissuras também podem ocorrer devido a gradientes térmicos entre os agregados e a pasta de cimento. Outra causa para tal efeito são as deformações incompatíveis entre esses mesmos componentes (CAETANO; RODRIGUES; PIMIENTA, 2019).

A constituição química da pasta de cimento Portland hidratada consiste, basicamente, em Hidrato de Silicato de Cálcio (C-S-H), Hidróxido de Cálcio (CH) e Hidrato de Sulfoaluminato de Cálcio (Etringita). Quando exposto à altas temperaturas, a 100 °C, ocorre a evaporação da água livre e, ainda, os compostos químicos hidratados iniciam o processo de desidratação. Assim, a pressão nos poros do concreto aumenta. Esse processo continua até uma temperatura em torno de 500 °C, quando a água cristalina começa a evaporar. Além disso, a esta temperatura, o Hidróxido de Cálcio se decompõe, porém, caso tenha CO<sub>2</sub> disponível, acima de 400 °C, pode ocorrer a formação de Carbonato de Cálcio (CaCO<sub>3</sub>). Dependendo do estágio em que esteja a decomposição do CH, pode-se reverter uma pequena parte desse processo por meio do resfriamento (CAETANO et al., 2019).

A degradação térmica da pasta de cimento é causada principalmente pelo desenvolvimento de microfissuras na interface de partículas de cimento desidratadas e a matriz de pasta de cimento, além de alterações na microestrutura do C-S-H (perda de água intersticial). Em temperaturas menores que 500 °C, em consequência da contração do volume total do concreto, os poros e as microfissuras pré-existentes se fecham. Este cenário se altera quando a temperatura ultrapassa 500 °C. Neste estágio, a incompatibilidade de deformação entre os agregados e a matriz cimentícia provoca novas fissuras nesta ligação (CAETANO et al., 2019).

Desse modo, a estrutura interna e a composição do concreto não sofrem grandes alterações em temperaturas de até 400 °C; apenas uma pequena redução ocorre na resistência à compressão. No entanto, ao elevar a temperatura, esta propriedade é reduzida bruscamente, de modo que, a 800 °C, a perda de resistência à compressão é quase total, devido à completa decomposição do C-S-H (LI et al., 2019a). A Figura 1 apresenta os gráficos de redução de resistência do concreto e do aço em função do aumento de temperatura.

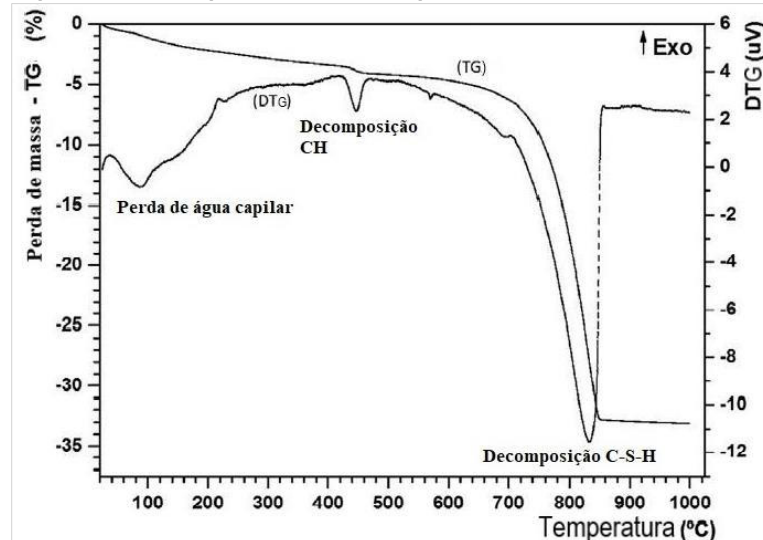
Figura 1 - Variação da resistência do concreto (a) e do aço (b) em função do aumento de temperatura.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15200 (2012).

A partir do ensaio de termogravimetria, é possível identificar as alterações químicas decorrentes do aumento de temperatura. A Figura 2 apresenta as curvas de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) para concreto de alto desempenho sem fibras, na qual é possível verificar os efeitos da temperatura na microestrutura do concreto descritos anteriormente.

Figura 2 – Termogravimetria e termogravimetria derivada do concreto.



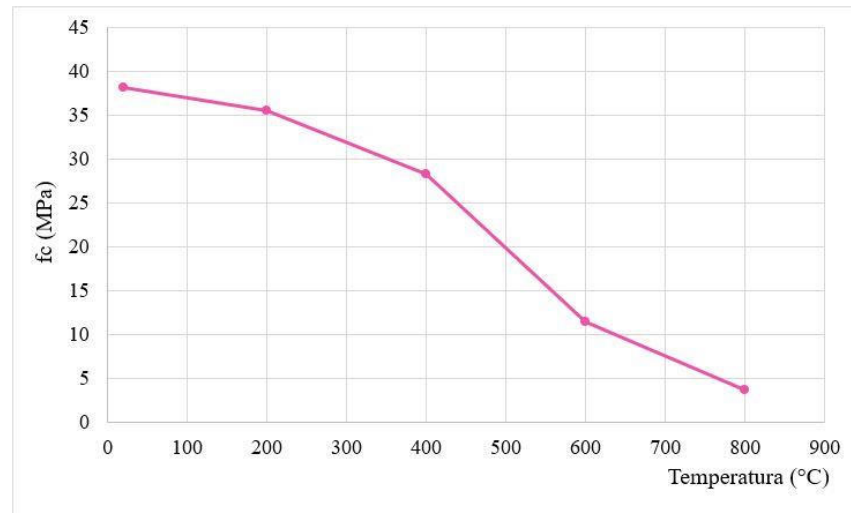
Fonte: Adaptado de Caetano et al. (2019).

Poon et al. (2001) analisaram o efeito do aumento de temperatura (200 °C, 400 °C, 600 °C e 800 °C) na resistência à compressão (Figura 3), com taxa de aquecimento de 2,5 °C/min, no concreto (traço 1:1,97:2,35:0,50) convencional. Os autores constataram uma pequena redução na resistência à compressão na temperatura de 200 °C. Para a temperatura de 400 °C foi observada uma redução de 26% nesta propriedade, em decorrência da expansão dos poros. Ao elevar a temperatura para 600 °C, houve uma redução mais significativa na resistência à compressão – resistência residual de 30%. Em virtude da decomposição do C-S-H, ocorreu uma drástica deterioração no concreto a 800 °C que ocasionou uma redução de 90% na resistência à compressão. Assim, os resultados obtidos pelos autores apresentam os efeitos das alterações



químicas apresentadas pelo ensaio de termogravimetria na resistência à compressão do concreto.

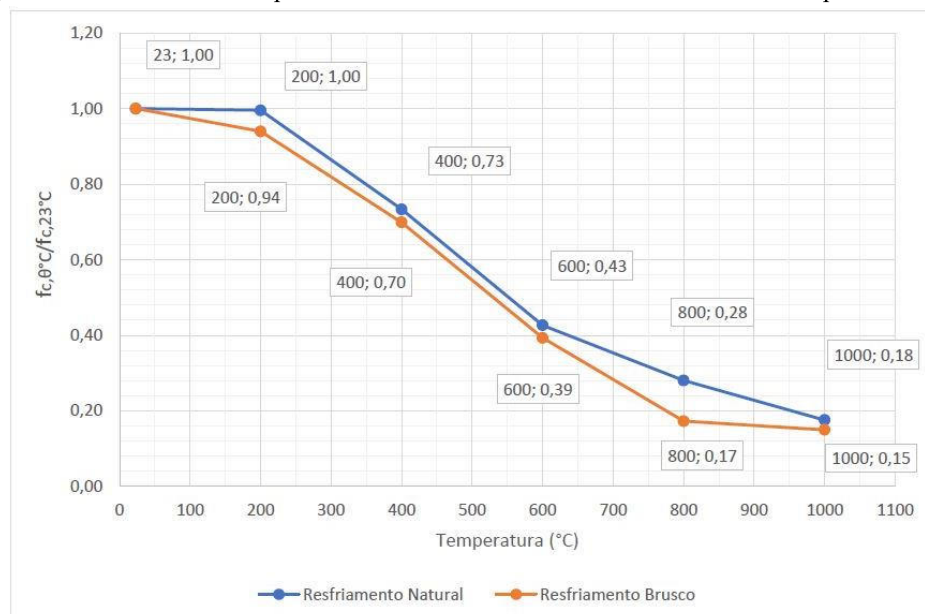
Figura 3 – Resistência à compressão do concreto em função da temperatura.



Fonte: Adaptado de Poon et al. (2001).

Segalin (2018), analisou a resistência à compressão residual do concreto convencional (constituído por cimento, areia, brita e água) após exposição a elevadas temperaturas (200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C e 1000 °C), variando o modo de resfriamento das amostras, isto é, os corpos de prova foram resfriados naturalmente ou de forma brusca por meio de submersão do concreto em água. Antes de expostos à elevadas temperaturas, os corpos de prova foram mantidos em estufa, a 105 °C por 24 horas, tendo em vista impedir a ocorrência do *spalling*. A Figura 4 trata sobre os resultados encontrados por este autor, em que é possível observar que o aumento gradativo da temperatura reduz, de forma considerável, a resistência à compressão do concreto.

Figura 4 – Resistência à compressão residual do concreto com o aumento de temperatura.



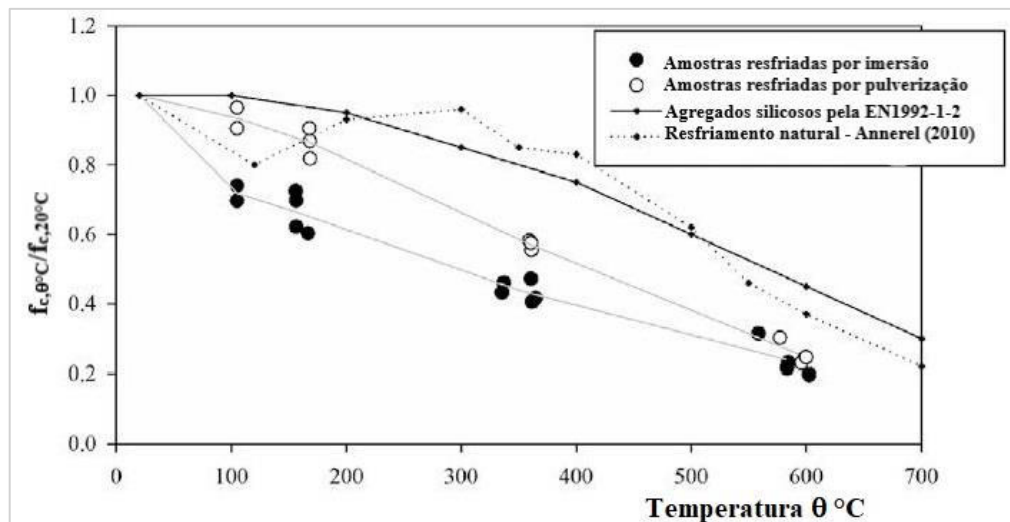
Fonte: Segalin (2018).

Botte e Caspeelee (2017) produziram corpos de prova de concreto composto por agregados silicosos com objetivo de analisar a influência do modo de resfriamento na resistência à compressão, após situação de incêndio. As temperaturas testadas foram 175 °C, 350 °C e 600 °C com taxa de aquecimento de 1 °C/min, e tempo de exposição de 15 horas na temperatura alvo. Para análise da resistência à compressão e da taxa de resfriamento foram moldados corpos de prova cúbicos de 150 mm de altura. Já para análise dos diagramas tensão-deformação, os corpos de prova eram cilíndricos com 106 mm de diâmetro e 330 mm de altura.

Tendo em consideração o modo de resfriamento, este foi realizado de duas formas: i) as amostras foram pulverizadas com água a 20 °C, por um período de cinco minutos; ii) as amostras ficaram submersas em água a 20 °C, monitoradas com o auxílio de termopares, até atingirem a temperatura ambiente. Os corpos de prova cúbicos foram submetidos ao ensaio de compressão, imediatamente após atingirem a temperatura ambiente, ao contrário das amostras cilíndricas que só foram ensaiadas após 56 dias, mantidas a  $20 \pm 1$  °C com umidade relativa de 60% (BOTTE; CASPEELE, 2017).

Os resultados mostraram que a resistência à compressão das amostras, quando submersas, sofreu uma redução mais expressiva em comparação aos corpos de prova pulverizados com água. Na Figura 5, verificam-se os efeitos do aquecimento e resfriamento, além da comparação com as curvas apresentadas na norma Eurocode 2 – Parte 1-2 (EN1992-1-2) e nos estudos de Annerel (2010) referenciado no artigo em questão. Com isso, nota-se que o concreto resfriado por meio de pulverização sofreu uma maior redução na resistência do que os resultados obtidos por Annerel (2010) e pela norma acima citada. Contudo, ao comparar a pulverização com o resfriamento por meio de imersão em água, neste último, a redução na resistência foi mais significativa (BOTTE; CASPEELE, 2017).

Figura 5 – Influência da temperatura na resistência à compressão residual do concreto para cada modo de resfriamento.



Fonte: Adaptado de Botte e Caspeelee (2017).

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para resistência à compressão residual para cada temperatura e modo de resfriamento. Com isso, nota-se que o resfriamento por imersão exerce maior influência nesta propriedade nas temperaturas de 175 °C e 350 °C, contudo a 600 °C, os resultados para os dois modos de resfriamento foram similares (BOTTE; CASPEELE, 2017).

Tabela 1 – Resistência à compressão residual para cada modo de resfriamento em cada temperatura analisada.

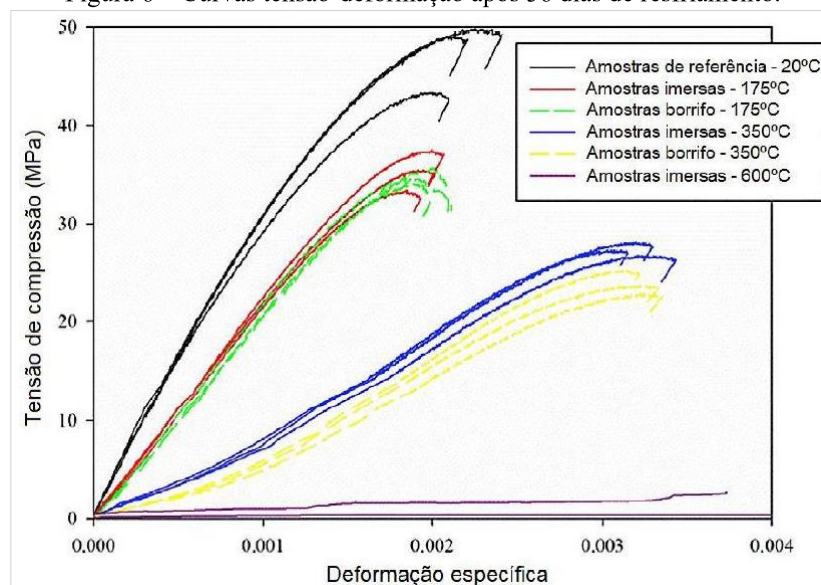
Temperatura (°C)	Resistência à compressão residual	
	Pulverização	Imersão
<b>175</b>	85%	65%
<b>350</b>	55%	45%
<b>600</b>	25%	20%

Fonte: Adaptado de Botte e Caspeelee (2017).

A respeito dos ensaios dos corpos de prova cilíndricos, a Figura 6 apresenta as curvas de tensão-deformação. Porém, para a temperatura de 600 °C não é apresentada a curva das amostras pulverizadas em virtude da extrema degradação destas; não se obteve resultado para este grupo. Pela Figura 6, observa-se que o aumento da temperatura ocasiona redução na resistência à compressão, além de aumento na deformação. Como o módulo de elasticidade pode ser obtido pela inclinação da curva tensão-deformação, também é possível analisar, nesta mesma figura, que esta propriedade é mais sensível ao aumento de temperatura do que a resistência à compressão (BOTTE; CASPEELE, 2017).

Acerca do modo de resfriamento, Botte e Caspeelee (2017) afirmam que não é possível analisar com clareza seu efeito em decorrência do tempo entre o resfriamento e o ensaio (56 dias). Durante este período, o concreto pode ter recuperado parcialmente, por reidratação do cimento, suas propriedades mecânicas.

Figura 6 – Curvas tensão-deformação após 56 dias de resfriamento.



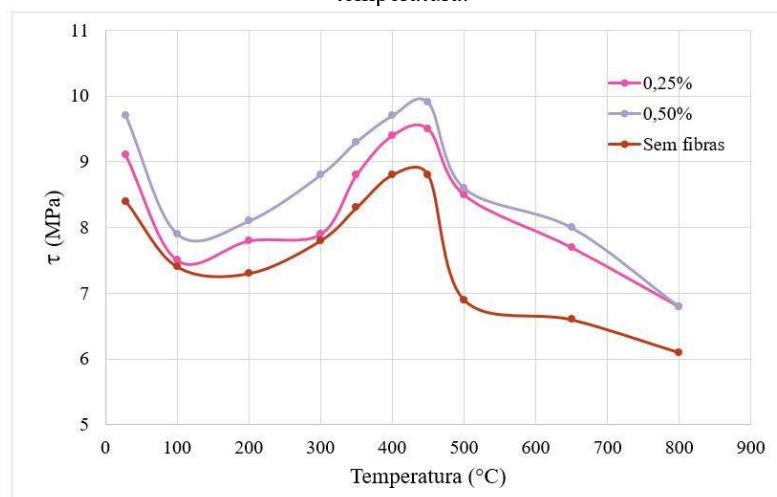
Fonte: Adaptado de Botte e Caspeelee (2017).

Outra propriedade afetada pela elevação de temperatura é a resistência ao cisalhamento. Moghadam e Izadifard (2019) analisaram o concreto comum aos 42 dias – traço 1:1,91:2,34:0,50 com corpos de prova prismáticos de 100x100x350 mm – nas temperaturas de 100 °C, 200 °C, 300 °C, 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 650 °C e 800 °C e compararam com o concreto reforçado com 0,25% e 0,50% de fibra de aço com ganchos nas duas extremidades e comprimento de 30 mm. Para o concreto sem fibras, a resistência de referência para o cisalhamento foi de 8,40 MPa a temperatura ambiente (resistência à compressão de 53,4 MPa). Observou-se uma redução gradativa a 100 °C e 200 °C devido a evaporação da água livre nos poros. A partir de 300 °C, verificou-se uma recuperação desta propriedade, estendendo-se até 450 °C. A partir de então, a resistência ao cisalhamento diminuiu até atingir o valor mínimo – resistência residual de 72,62% – a 800 °C.

Em relação ao CRFA, os resultados obtidos pelos autores mostraram que a adição de 0,25% e 0,50% de fibras de aço conferiu um aumento de 16,6% e 20,95%, respectivamente, na resistência ao cisalhamento do concreto, a temperatura ambiente, aos 42 dias. Todavia, conforme Figura 7, ao elevar a temperatura para 100 °C, para ambas as adições de fibras houve um decréscimo na resistência. A partir de 200 °C, verificou-se um aumento na resistência ao cisalhamento, com pico à 450 °C. A razão para esse feito é devido ao enrijecimento do gel de cimento (C-S-H). Acima disto, a tensão volta a diminuir até atingir o valor mínimo a 800 °C (MOGHADAM; IZADIFARD, 2019).

Além disso, a inclusão de 0,50% de fibra de aço obteve valores de resistência mais elevados do que as amostras com 0,25%. Ao comparar os resultados obtidos com o concreto sem fibras, nota-se que a maior eficiência das fibras de aço, tanto para 0,25% quanto para 0,50%, esteve a 500 °C, em que o aumento da resistência ao cisalhamento foi de 22,52% e 24,92%, respectivamente (MOGHADAM; IZADIFARD, 2019).

Figura 7 – Resultado do ensaio de cisalhamento para cada proporção de fibra de aço em função do aumento de temperatura.



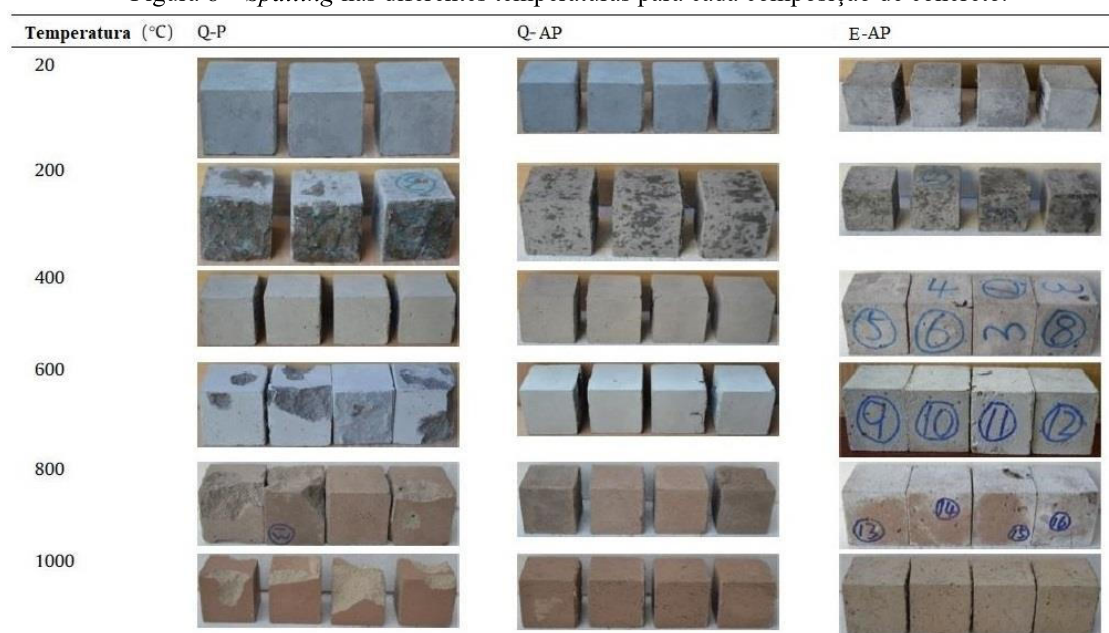
Fonte: Adaptado de Moghadam e Izadifard (2019).

O aumento de temperatura pode causar, ainda, o fenômeno conhecido como *spalling*, ou fragmentação, no qual uma parte da camada superficial do concreto se destaca, por vezes, até de maneira explosiva, devido a pressão de vapor de água existente nos poros do concreto. Desse mecanismo, há exposição das armaduras comprometendo a capacidade de carga dos elementos estruturais. Alguns dos fatores de influência do *spalling* são o grau de saturação dos poros, as propriedades físicas do concreto quanto a sua porosidade e a taxa de aquecimento a que o concreto é submetido (LI et al., 2019b).

Assim, todos os tipos de concreto estão suscetíveis a este fenômeno, porém concretos de ultra alto desempenho (resistência maior que 150 MPa) são mais vulneráveis ao *spalling* devido sua microestrutura ser mais compacta e a permeabilidade ser menor que de concretos, comuns de forma a ocorrer, possivelmente, o *spalling* explosivo (LI et al., 2019b).

Liang et al. (2018), investigaram a influência das fibras no concreto de ultra alto desempenho em situação de incêndio (200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C e 1000 °C, tempo de exposição de duas horas e taxa de aquecimento de 4 °C/min) no *spalling* (Figura 8), além de variar o tipo de agregado miúdo – areia de quartzo (Q) e escória de aço (E). Os autores afirmam que a pressão de vapor é um dos fatores determinantes na ocorrência e intensidade do *spalling*. Uma alternativa para contornar este problema é a utilização das fibras. Fibras de polipropileno (P) são capazes de controlar este fenômeno, uma vez que derretem a aproximadamente 165 °C, de forma a liberar a pressão de vapor, embora não o eliminem completamente. Já, as fibras de aço (A) podem reduzir a probabilidade e a intensidade da fragmentação, pois sua adição aumenta a resistência à tração, e este fenômeno só ocorre quando a pressão interna é maior do que a resistência à tração.

Figura 8 – *Spalling* nas diferentes temperaturas para cada composição de concreto.



Fonte: Adaptado de Liang et al. (2018).

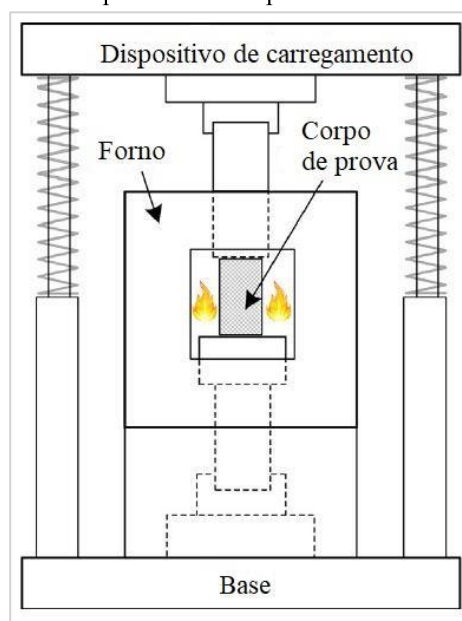


## 2.2 ESTADO DA ARTE SOBRE CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS SUBMETIDOS À ELEVADAS TEMPERATURAS

Li et al. (2019a), com o objetivo de analisarem as propriedades referentes à compressão do concreto reforçado com fibra de aço, submeteram corpos de prova à elevadas temperaturas variando-as (200 °C, 400 °C, 600 °C e 800 °C) e compararam os resultados com a resistência à compressão do CRFA à temperatura ambiente (23 + 2 °C).

Para a realização dos ensaios, utilizaram diferentes frações volumétricas de fibra de aço (0, 1% e 2%), traço 1:1,11:1,67:0,30 e superplastificante de ácido policarboxílico como aditivo. As fibras de aço empregadas foram microfibras retas, revestidas com latão de 6 mm de comprimento. Os testes foram executados em um aparelho de compressão de alta temperatura (Figura 9), composto por um forno de resistência, um dispositivo de controle de temperatura, um dispositivo de carregamento e aquisição de dados e, também, um sistema de refrigeração. Após atingirem a temperatura alvo – taxa de aquecimento de 200 °C/h –, os corpos de prova foram carregados no forno com a temperatura mantida constante (LI et al., 2019a).

Figura 9 – Esquema do aparelho de compressão de alta temperatura.

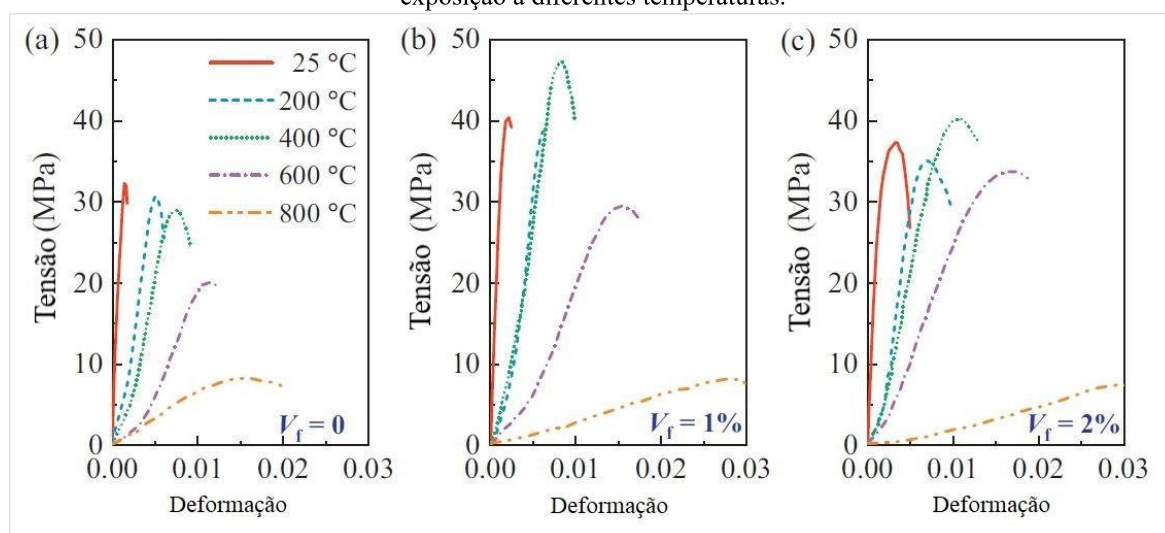


Fonte: Adaptado de Li et al. (2019a).

A Figura 10 ilustra os resultados obtidos para cada fração volumétrica – 0 (a), 1% (b) e 2% (c) – de fibra de aço. Observa-se que as curvas tensão-deformação se tornaram mais achatadas com o aumento de temperatura, isto é, ocorreu uma diminuição gradativa na inclinação das curvas indicando uma redução do módulo de elasticidade. A partir da Figura 10(a), também se verifica que, abaixo de 400 °C, a tensão de compressão no concreto sem fibras sofre um decréscimo pequeno, em torno de 12% da tensão à temperatura ambiente (LI et al., 2019a).

Para o concreto com fibra de aço, tanto para 1% quanto para 2%, nota-se um aumento da tensão de compressão na temperatura de 400 °C. Uma possível explicação para tal fenômeno é que, na faixa de temperatura de 200 °C à 400 °C, o silicato de cálcio hidratado sofre desidratação de forma que os agregados se expandem, aproximando-se das fibras de aço também expandidas. O resultado disto é um aumento na resistência. No entanto, em temperaturas acima de 400 °C, devido às diferentes propriedades de expansão térmica das partículas agregadas e da pasta de cimento endurecida, são geradas trincas por conta da incompatibilidade térmica sob alta temperatura na área de interação entre elas, decrescendo a resistência à compressão do concreto (LI et al., 2019a).

Figura 10 – Curvas tensão-deformação do concreto sem (a) e com 1% (b) e 2% (c) de fibra de aço após exposição a diferentes temperaturas.



Fonte: Adaptado de Li et al. (2019a).

Li et al. (2019a) ainda explicam que o concreto com 1% de fibra obteve um melhor desempenho do que com 2%, a temperaturas menores que 600 °C, comprovando a premissa de que a dosagem ideal de fibra, geralmente, é entre 1 a 1,5%. Ao aumentar a quantidade de fibra, a dispersão destas se torna difícil, o que gera influência negativa no desempenho do CRFA. Contudo, com o aumento de temperatura – maior que 600 °C – a incorporação de fibra não exerce influência significativa na resistência, em consequência da deterioração da matriz cimentícia.

Outra propriedade influenciada pela adição de fibras é a tenacidade. Além da resistência à compressão, Li et al. (2019a) calcularam a tenacidade pela área sob as curvas tensão-deformação até o valor de tensão máxima. Assim, constatou-se que, ao aumentar a temperatura, a tenacidade aumenta inicialmente, por conta do aumento da tensão crítica. Contudo, com a redução acentuada da resistência, a tenacidade também diminui. Além disso, a quantidade de fibras influenciou, de forma significativa, no aumento desta característica sob temperaturas menores que 600 °C. Isso demonstra que a adição de fibra de aço desempenha um papel

importante na tolerância à deformação térmica não uniforme e, também, é capaz de inibir ou reduzir a propagação de microfissuras, ou seja, aumenta a capacidade de absorção de energia do concreto.

Serrano et al. (2016) analisaram a influência das fibras no concreto, comparando o comportamento mecânico do concreto com adição de fibra metálica e de polipropileno (CRFP) com concreto sem fibras, quando exposto à ação direta do fogo, com temperatura máxima em torno de 400°C. Para tanto, utilizaram traço de 1:2,07:3,58:0,50, fibras de aço trefiladas retas, com ganchos nas bordas de cada fibra, e fibras de polipropileno monofilamento. As proporções de fibras analisadas foram de 1% e 2% para cada tipo de fibra.

As amostras (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) foram expostas ao fogo, conforme Figura 11, considerando um potencial calorífico de 40 kg de madeira por metro quadrado (equivalente ao valor médio do potencial calorífico de incêndios em edifícios), durante uma hora, medindo-se a temperatura da superfície do concreto a 15, 30, 45 e 60 minutos. Transcorrido esse tempo, as amostras foram resfriadas de forma natural e, então, foi realizado o ensaio de compressão (SERRANO et al., 2016). Os resultados encontrados de tensão máxima e tensão de ruptura, para cada tipo de concreto, encontram-se na Tabela 2.

Figura 11 – Corpos de prova expostas ao fogo, à esquerda, e medição da temperatura, à direita.



Fonte: Serrano et al. (2016).

Tabela 2 – Tensão máxima e tensão de ruptura do concreto com e sem adição de fibras antes e após exposição ao fogo.

	Adição de fibras	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_{\max} - \sigma_u$ (MPa)
<b>Resistência à compressão (Temperatura ambiente)</b>	Sem adição	14,372	10,063	4,309
	Polipropileno 1%	25,051	17,963	7,088
	Polipropileno 2%	24,933	17,462	7,471
	Aço 1%	21,088	14,769	6,319
	Aço 2%	21,993	15,399	6,594
<b>Resistência à compressão (400 °C)</b>	Sem adição	19,556	10,938	8,618
	Polipropileno 1%	32,549	9,593	22,956
	Polipropileno 2%	28,270	12,665	15,606
	Aço 1%	30,186	10,988	19,198
	Aço 2%	27,945	9,517	18,428

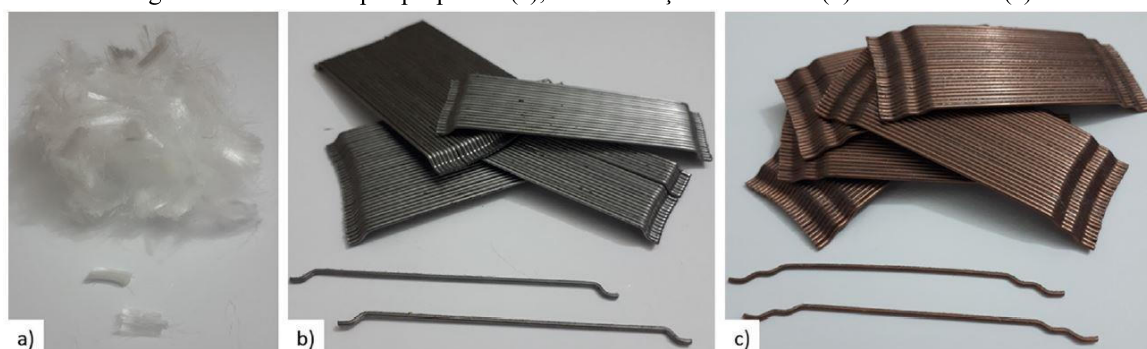
Fonte: Adaptado de Serrano et al. (2016).



Assim, com esses resultados constata-se que, com a adição de fibras, tanto de polipropileno quanto de aço, ocorre um aumento na resistência à compressão em relação ao concreto sem adição, além de ocorrer um aumento da tensão máxima para cada tipo de concreto após elevar a temperatura até 400 °C. Ao comparar o concreto com fibra de polipropileno com o concreto com fibra de aço, é possível notar que o CRFP atinge valores de resistência mais elevados, tanto para a fração volumétrica de 1% quanto de 2%, pois ao atingir o ponto de fusão (170 °C) das fibras de polipropileno, são criados múltiplos canais na massa de concreto permitindo a liberação do vapor d'água para estes vazios formados no concreto, o que reduz a temperatura, de forma gradual, e diminui a fissuração na fase de resfriamento (SERRANO et al., 2016).

Caetano et al. (2019) investigaram a resistência à compressão de concretos de alto desempenho quando submetidos a situações de incêndio. Para a produção dos corpos de prova, foram utilizadas fibras Dramix 3D e Dramix 5D (Figura 12) de 60 mm de comprimento, nas quantidades de 45 e 75 kg/m<sup>3</sup>, e superplastificante Sika ViscoCrete 3002 HE como aditivo. Além da fibra de aço, todas as amostras possuíam 2 kg/m<sup>3</sup> de fibra de polipropileno. As temperaturas analisadas foram 300 °C, 500 °C e 700 °C, sob taxa de aquecimento de 3 °C/min e tempo de exposição na temperatura alvo de uma hora. Antes do aquecimento, aplicou-se uma pré-carga de 20% do valor médio da resistência à compressão a temperatura ambiente (20 °C): 79 MPa para o concreto sem fibras, 84 MPa para o CRFA com 45 e 75 kg/m<sup>3</sup> de fibra 3D, 83 MPa para o CRFA com 45 kg/m<sup>3</sup> de fibra de aço 5D e 93 MPa para 75 kg/m<sup>3</sup> de fibra 5D.

Figura 12 – Fibras de polipropileno (a), fibras de aço Dramix 3D (b) e Dramix 5D (c).



Fonte: Caetano et al. (2019).

Segundo Caetano et al. (2019), a resistência à compressão de cada composição manteve-se praticamente constante ao comparar os resultados das amostras a temperatura ambiente e a 300 °C. Observou-se uma diminuição acentuada na resistência, conforme Tabela 3, após elevar a temperatura para 500 °C (desidratação do CH). A 700 °C, a redução na resistência foi mais significativa ainda (decomposição do C-S-H). Além disso, para as temperaturas de 20 °C, 300 °C e 500 °C, as curvas tensão-deformação (Figura 13) tendem a um comportamento semi-

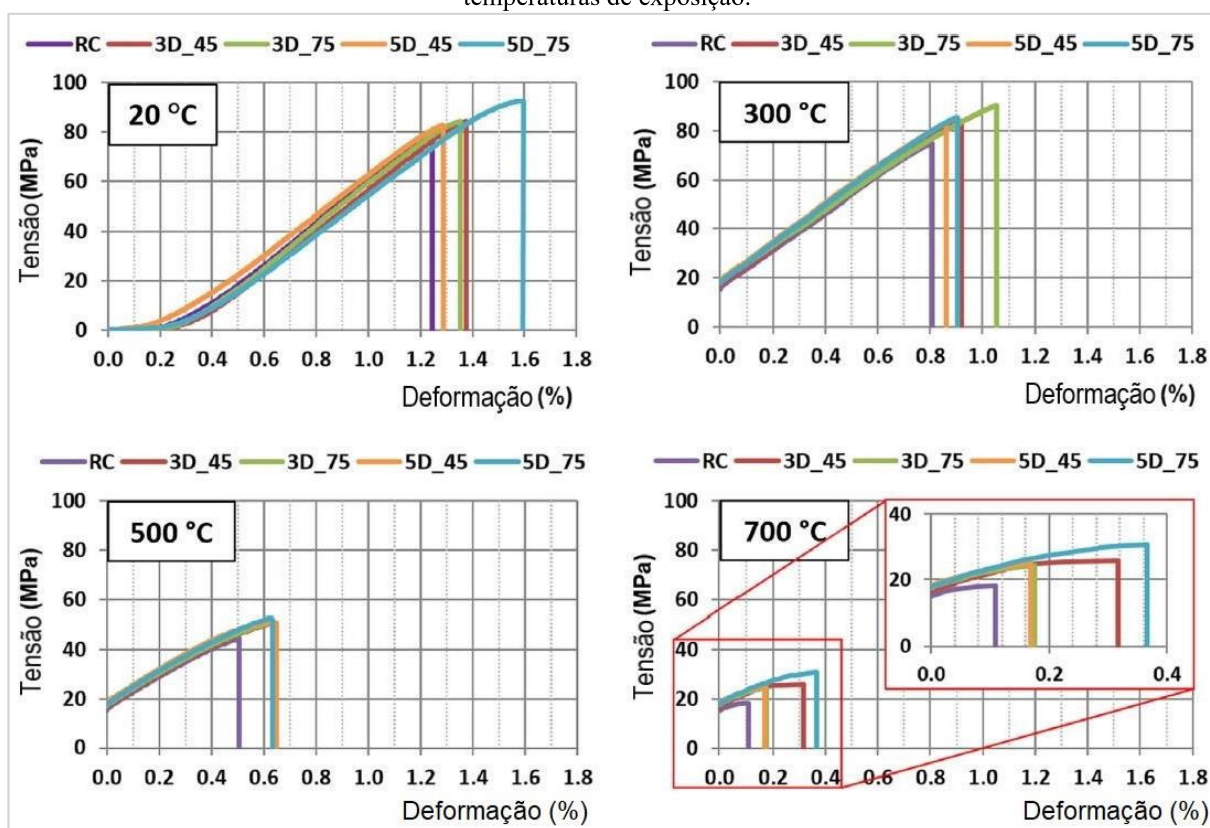
elástico do material até o ponto de ruptura. Já, a 700 °C, este comportamento se altera para semiplástico, segundo os autores.

Tabela 3 - Redução na resistência à compressão em porcentagem para o concreto com diferentes quantidades de fibras do tipo 3D e 5D, após exposição à 500 °C.

Adição e tipo de Fibra	Redução na resistência à compressão (%)
Sem adição	44
45 kg/m <sup>3</sup> - 3D	40
75 kg/m <sup>3</sup> - 3D	39
45 kg/m <sup>3</sup> - 5D	39
75 kg/m <sup>3</sup> - 5D	43

Fonte: Adaptado de Caetano et al. (2019)

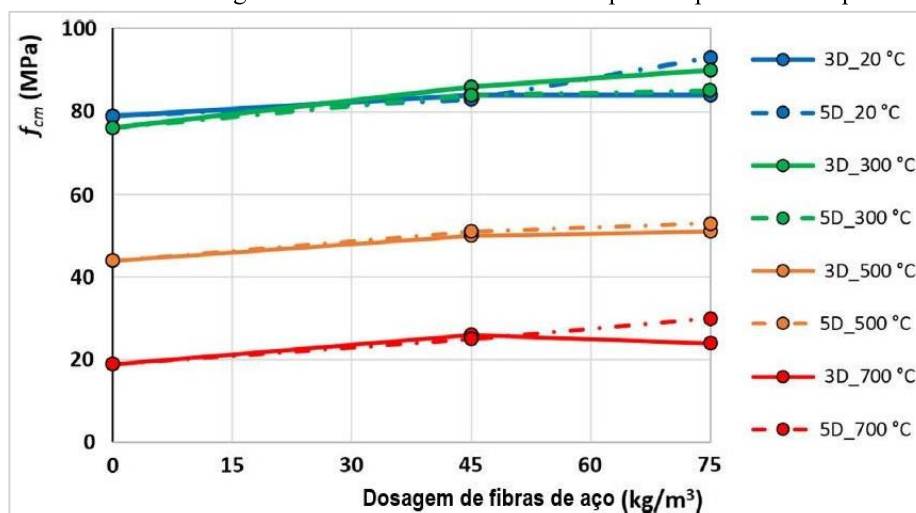
Figura 13 – Curvas tensão-deformação para cada composição do concreto com fibra de aço nas diferentes temperaturas de exposição.



Fonte: Adaptado de Caetano et al. (2019).

No que se refere a adição de fibras de aço, um aumento na tensão de compressão foi observado. À temperatura ambiente, todas as amostras contendo fibras obtiveram sua resistência elevada em comparação ao concreto sem fibras, porém a composição de 75 kg/m<sup>3</sup> de fibra 5D obteve um resultado mais satisfatório do que as outras composições. À temperatura de 300 °C, as fibras de aço 3D aumentaram a resistência de forma mais significativa do que as fibras 5D. Já, a 500 °C, este cenário se inverte: as fibras 5D possuem um melhor desempenho do que as fibras 3D. Para 700 °C, a resistência à compressão foi praticamente a mesma para os dois tipos de fibras, conforme é possível observar na Figura 14 (CAETANO et al., 2019).

Figura 14 – Influência da dosagem das fibras na resistência à compressão para cada temperatura.



Fonte: Adaptado de Caetano et al. (2019).

Caetano, Rodrigues e Pimienta (2019), por meio de ensaios realizados em concreto de alto desempenho com fibras de aço, constataram que, a partir do aumento de temperatura, a área sob a curva tensão-deformação diminui gradativamente, isto é, a energia de fratura (tenacidade) sofre uma redução e um aumento na ductilidade, ou seja, o concreto começa a apresentar sinais de falha (fissuras) antes da ruptura, tornando o comportamento menos frágil, o que implica numa maior segurança da estrutura.

As fibras utilizadas foram do tipo Dramix 3D e Dramix 5D, com quantidades de 45 e 75  $\text{kg/m}^3$ . Foram utilizadas, ainda, fibras de polipropileno em todas as amostras na quantidade de 2  $\text{kg/m}^3$ . A variação da temperatura (300 °C, 500 °C e 700 °C) ocorreu sob taxa de aquecimento de 3 °C/min e tempo de exposição na temperatura alvo de uma hora. Foram moldadas vigas com seção transversal de 150x150 mm e comprimento de 600 mm. O comprimento das fibras não excedeu 60 mm (CAETANO; RODRIGUES; PIMIENTA, 2019).

Em relação a flexão – ensaio de três pontos –, de acordo com Caetano, Rodrigues e Pimienta (2019), a adição dos dois tipos fibras (3D e 5D) aumenta a resistência do concreto à temperatura ambiente e a elevadas temperaturas. Em relação à influência da temperatura, a 300 °C, exceto para o concreto com a fibra Dramix 3D, na quantidade de 45  $\text{kg/m}^3$ , todas as amostras sofreram decréscimo na tensão de flexão. Para os corpos de prova com 45  $\text{kg/m}^3$  de fibra de aço Dramix 3D, houve um aumento de 3% na resistência. Já, a 500 °C, todas as composições sofreram significativa redução na resistência à flexão.

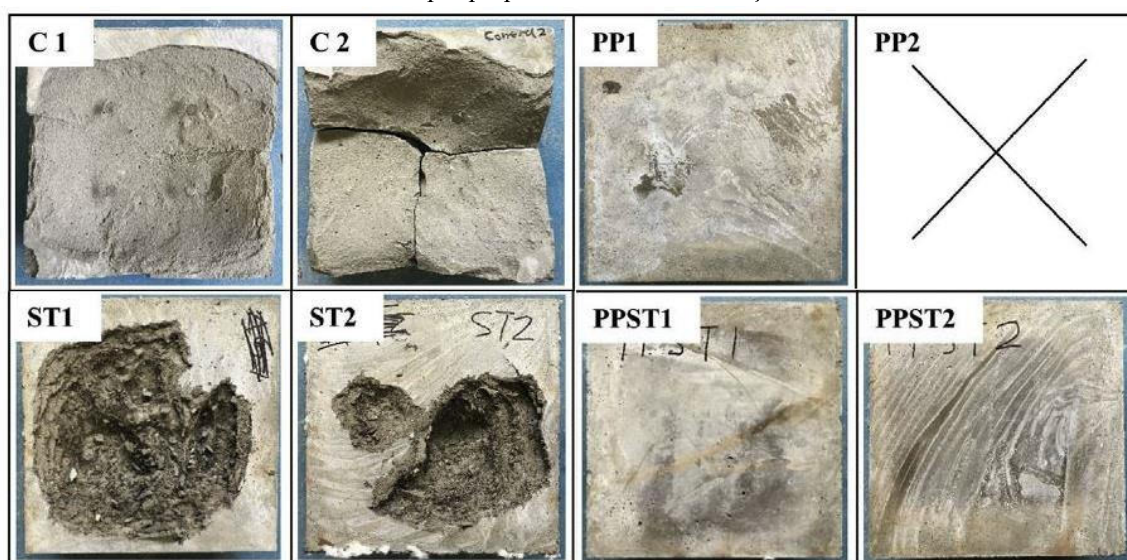
Li et al. (2019b) investigaram a influência das fibras de polipropileno e de aço no *spalling* em concretos de ultra alto desempenho em situação de incêndio (temperatura alvo de 600 °C e taxa de aquecimento de 2 °C/min). À temperatura ambiente, as características verificadas foram a resistência à compressão e a resistência à tração uniaxial. Para a moldagem

dos corpos de prova, utilizou-se cimento Portland (ASIA CEM I 52,5 N), areia natural de rio, areia de micro sílica, sílica ativa altamente reativa, superplastificante à base de policarboxilato, fibras de aço de 13 mm de comprimento – 2,50% do volume – e fibras de polipropileno, monofilamento de 12 mm de comprimento – 0,33% do volume. O fator água-cimento foi de 0,22.

A resistência à compressão de referência (concreto sem fibras e à temperatura ambiente) foi de 149,60 MPa, e a de tração foi de 8,90 MPa. A adição das fibras de polipropileno elevou a resistência à compressão do concreto em 6,80% (159,70 MPa) e diminuiu a resistência à tração em 4,50% (8,50 MPa). A razão para tal resultado se deve à fração volumétrica de fibras utilizada ser de apenas 0,33%. Para o concreto reforçado com fibra de aço, o incremento de resistência à compressão foi de 15% (172,20 MPa) e para a resistência à tração foi de 41% (12,40 MPa). Tal fato ocorreu devido as fibras de aço restringirem a deterioração do material interno e a propagação de trincas, de forma a absorver as tensões geradas (LI et al., 2019b).

Quanto ao *spalling*, a adição de fibras de aço não foi suficiente para evitar a ocorrência do fenômeno, contudo houve uma melhora nesta propriedade em relação ao concreto sem fibras (Figura 15), o qual sofreu, além da fragmentação inicial, fragmentação progressiva, ou seja, o *spalling* se propagou para as regiões mais profundas das amostras. Já os corpos de prova contendo fibras de polipropileno não se fragmentaram (LI et al., 2019b).

Figura 15 – *Spalling* para cada tipo de concreto, sendo: C referente ao concreto de referência; PP à adição de fibra de polipropileno e ST à fibra de aço.



Fonte: Adaptado de Li et al. (2019b).



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados (Figura 16), listados a seguir, para a produção do concreto com fibra metálica foram disponibilizados pelo Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Toledo; são eles:

- Cimento Portland CP II F – 32;
- Areia de quartzo fina com módulo de finura de 1,85, como agregado miúdo (massa específica de 2,646 g/cm<sup>3</sup>);
- Brita basáltica com dimensão máxima característica igual a 9,52 mm, como agregado graúdo (massa específica de 3,010 g/cm<sup>3</sup>);
- Água;
- Fibra de aço reta com 13 mm de comprimento (massa específica de 7850 kg/m<sup>3</sup>).

Figura 16 – Materiais utilizados para produção do concreto.



Fonte: Autoria própria (2019).

#### 3.2 MÉTODOS

##### 3.2.1 Determinação do traço

O traço utilizado neste trabalho foi o mesmo dosado por Segalin (2018), uma vez que os materiais utilizados são os mesmos. A dosagem utilizada seguiu o método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), no qual se faz necessário conhecer os seguintes dados:

- A. Cimento
  - a) Massa específica
- B. Agregado miúdo
  - a) Módulo de finura (MF);
  - b) Massa específica.
- C. Agregado graúdo
  - a) Dimensão máxima característica (DMC);
  - b) Massa específica;
  - c) Massa unitária compactada.

A caracterização dos agregados seguiu as diretrizes da NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003). Os ensaios de massa específica dos materiais foram realizados em acordo às normas referentes a cada material, isto é, o ensaio de massa específica do cimento cumpriu a NBR 16605 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica (ABNT, 2017); para o agregado miúdo, a norma utilizada foi a NBR NM 52 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente (ABNT, 2009a), e para o agregado graúdo, empregou-se a NBR NM 53 – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT, 2009b).

Os resultados encontrados por Segalin (2018) encontram-se na Tabela 4 e são utilizados para dosagem do concreto pelo método da ABCP. A partir disso, determina-se o traço, sendo este igual a 1:1,53:2,12:0,48 com um *slump* igual a 90 mm (Segalin, 2018). Vale ressaltar que no trabalho de Segalin (2018) não foram utilizadas fibras em seus ensaios. As fibras de aço foram utilizadas neste trabalho e o mesmo traço de concreto utilizado por Segalin (2018) foi inicialmente mantido. A este traço foram adicionadas fibras para testes preliminares conforme descrito no item 3.2.7. Entretanto, durante o desenvolvimento do programa experimental, observou-se a presença de significativa quantidade de material pulverulento junto ao agregado graúdo. Desta forma, um ajuste no fator água/cimento foi necessário, de modo que o traço utilizado foi corrigido para 1:1,53:2,12:0,56.

Em relação à quantidade de fibra de aço, optou-se por uma proporção de 1% em relação ao volume de concreto, ou seja, aproximadamente 80 kg de fibra por metro cúbico de concreto. Esta quantidade foi definida de acordo com os resultados apresentados por Li et al. (2019a) e Serrano et al. (2016) visto que os corpos de prova com 1% de fibra de aço apresentaram melhores resultados do que outras proporções.

Tabela 4 – Ensaio de massa específica e caracterização dos materiais.

<b>Ensaio</b>	<b>Cimento</b>	<b>Brita</b>	<b>Areia</b>
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	3,061	3,010	2,646
<b>Massa unitária compactada (g/cm<sup>3</sup>)</b>	-	1,585	-
<b>DMC (mm)</b>	-	9,520	2,380
<b>MF</b>	-	-	1,850

Fonte: Adaptado de Segalin (2018).

### 3.2.2 Produção dos corpos de prova

A preparação do concreto foi feita de forma manual no Laboratório de Materiais de Construção da UTFPR, Campus Toledo, devido a quantidade de material a ser misturada. Dividiu-se em cinco dias de moldagem para que as amostras fossem colocadas na mufla com a mesma idade, visto que a capacidade máxima desta é de 12 corpos de prova.

A partir do traço obtido, foram produzidos 66 corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura – devido à limitação do tamanho da mufla na UTFPR-TD – no total. Para os ensaios de aquecimento foram destinados 60 corpos de prova, divididos em grupos conforme Tabela 5. Isto é, para cada temperatura (200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C e 1000 °C) foram moldados 12 corpos de prova: seis amostras destinadas ao resfriamento lento e seis para o resfriamento brusco.

Tabela 5 – Grupos de corpos de prova separados por temperatura e modo de resfriamento.

<b>Temperatura de exposição (°C)</b>	<b>Resfriamento lento</b>	<b>Resfriamento brusco</b>
<b>23 ± 2 (Referência)</b>	G0 (sem aquecimento)	
<b>200</b>	G1	G2
<b>400</b>	G3	G4
<b>600</b>	G5	G6
<b>800</b>	G7	G8
<b>1000</b>	G9	G10

Fonte: Autoria própria (2019).

Além disso, para a temperatura de referência (23 ± 2 °C), no primeiro dia de moldagem, outros seis corpos de prova foram produzidos (grupo G0). Desse modo, a Tabela 6 apresenta as quantidades necessárias de cada material para a produção dos 66 corpos de prova de concreto reforçado com fibra de aço.

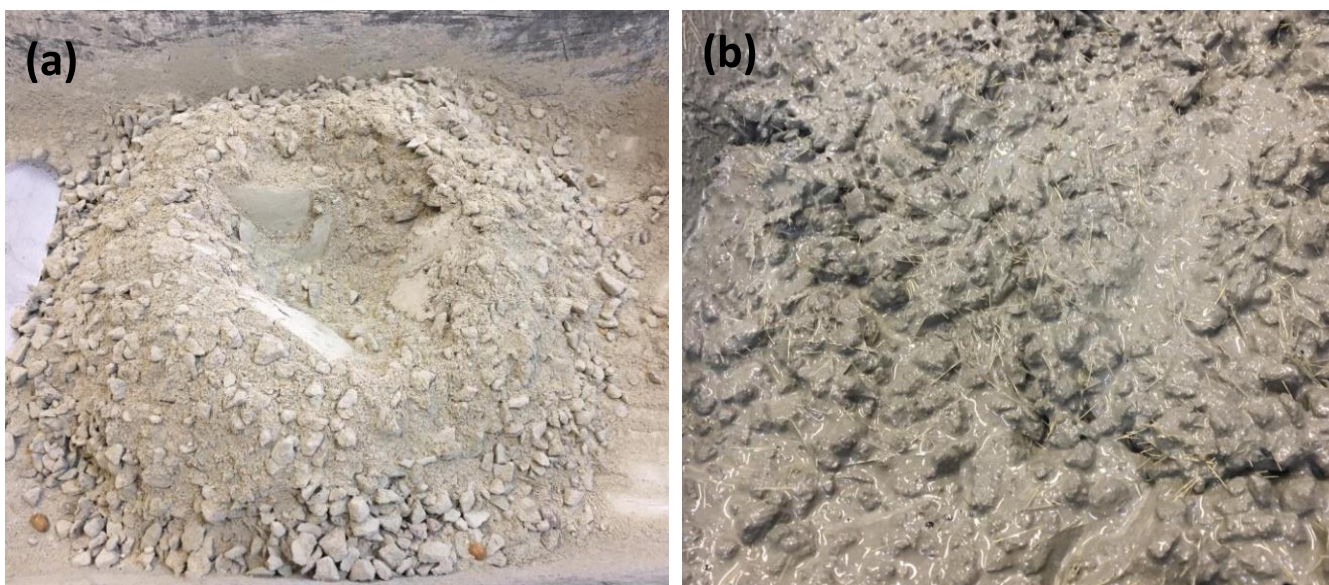
Tabela 6 – Quantidade de cada material para a produção de 78 corpos de prova de CRFA.

<b>Material</b>	<b>Quantidade (kg)</b>
<b>Cimento CP II F – 32</b>	6,2010
<b>Areia</b>	9,4778
<b>Brita</b>	13,1462
<b>Água</b>	2,9806
<b>Fibra de aço reta</b>	1,0173

Fonte: Autoria própria (2019).

A etapa de preparação seguiu a NBR 12821 – Preparação de concreto em laboratório – Procedimento (ABNT, 2009c). Primeiro, foram misturados os materiais agregados e aglomerantes secos, Figura 17(a), e, posteriormente, adicionou-se a água. As fibras foram o último material a ser acrescentado, Figura 17(b). Então, com o concreto pronto e em estado fresco, os corpos de prova foram moldados.

Figura 17 - (a) Materiais secos misturados; (b) Concreto com fibra de aço em estado fresco.



Fonte: Autoria própria (2020).

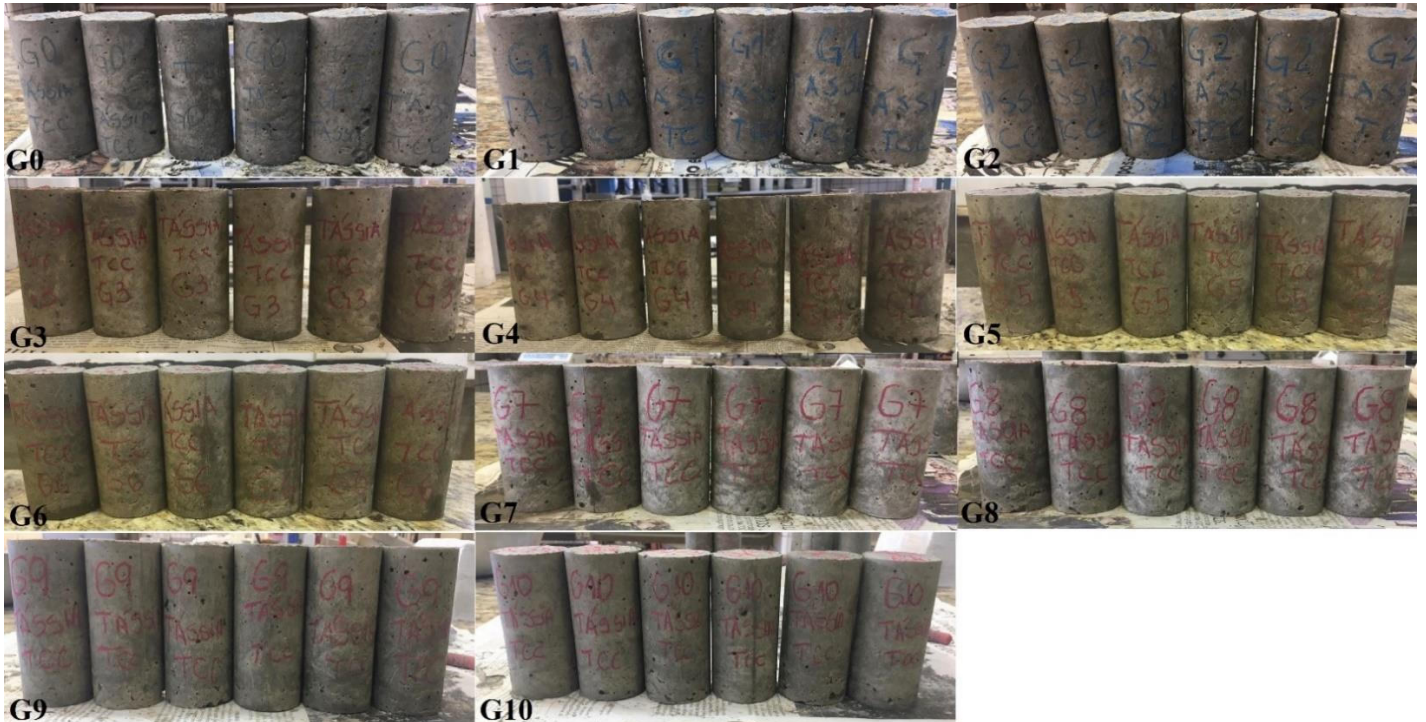
Devido ao pequeno volume de concreto, em decorrência do tamanho e quantidade de corpos de prova, o ensaio de abatimento de tronco de cone, conhecido por *slump*, não foi realizado. O traço original, calculado por Segalin (2018), previa um *slump* de 90 mm. Logo, de acordo com a NBR 8953 – Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência (ABNT, 2015b), este concreto se enquadra na classe de consistência S50, não sendo, portanto, concreto estrutural. Contudo, optou-se por não utilizar aditivo para melhorar essa propriedade pois, o objetivo é analisar as alterações decorrentes de aquecimento e resfriamento no concreto convencional com fibra de aço.

A moldagem e a cura das amostras seguiram a NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2015a). O adensamento foi realizado com o auxílio de uma haste metálica – duas camadas com 10 golpes cada.

Em relação ao desmolde, este foi feito 24 horas após a produção do concreto. As amostras, durante este período, ficaram dispostas em superfície plana e horizontal. Após esta etapa, todos os corpos de prova foram devidamente identificados (Figura 18).



Figura 18 - Corpos de prova, separados em grupos, após desmoldagem.



Fonte: Autoria própria (2020).

Para a cura (Figura 19), as amostras permaneceram em solução saturada de hidróxido de cálcio, a temperatura ambiente de  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , por um período de 27 dias. Os corpos de prova foram, então, retificados, conforme Figura 20, com o objetivo de nivelar a superfície.

Figura 19 - Corpos de prova em solução saturada de hidróxido de cálcio para cura.



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 20 – Corpo de prova durante retificação para nivelamento da superfície.



Fonte: Autoria própria (2020).

### 3.2.3 Taxa de aquecimento, exposição a elevadas temperaturas e modo de resfriamento

Para evitar o fenômeno do *spalling* durante a fase de aquecimento, todas as amostras, com exceção do grupo G0, no 27º dia, foram submetidas a 105 °C, na estufa, por 24 horas, para que ocorresse evaporação da água livre presente nos poros do concreto, o que causou a redução da pressão nos poros.

Para a exposição a elevadas temperaturas, no 28º dia, 12 corpos de prova foram colocados no Forno Mufla MARQLABOR MAQMUF2-RP, com 3500 W de potência e dimensões de 15x15x30 cm (Figura 21), do Laboratório de Saneamento da UTFPR, Campus Toledo. Com o objetivo de evitar o efeito de fadiga pela variação de temperatura, a mufla foi ligada quando faltava uma hora para o término da etapa predecessora. Para dar início ao aquecimento, as amostras foram dispostas na mufla quando esta atingiu 105 °C. Após ser atingida a temperatura de exposição pretendida, o cronômetro foi iniciado para controle do tempo de exposição de 7 horas. Em decorrência da baixa condutividade térmica do concreto – 1,3 W/m°C para concretos com agregado silicoso (ABNT NBR 15200/2012) –, é necessário um tempo de exposição longo para que todo o corpo de prova – externa e internamente – atinja a temperatura alvo.

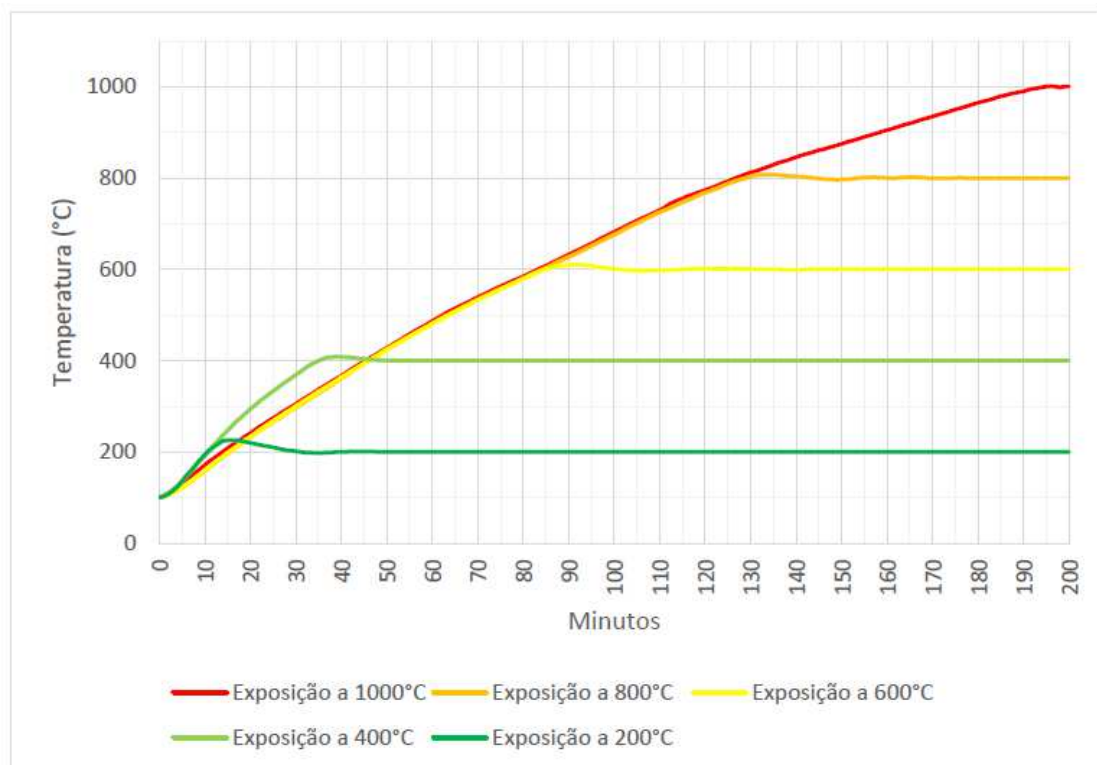
Figura 21 – (a) Forno Mufla MARQLABOR MAQMUF2-RP; (b) Corpos de prova expostos a 1000 °C.



Fonte: Autoria própria (2020).

Em relação à taxa de aquecimento, Segalin (2018) monitorou a temperatura, minuto a minuto, com cronômetro, até a temperatura alvo ser atingida. A Figura 22 apresenta as curvas de aquecimento para as temperaturas estabelecidas. Devido ao modelo da mufla, a taxa de aquecimento é variável para cada temperatura, isto é, quanto maior a temperatura de exposição, menor a taxa de aquecimento. Na Tabela 9, estão dispostas as taxas de aquecimento médias.

Figura 22 – Taxa de aquecimento do forno mufla em °C/min.



Fonte: Segalin (2018).



Tabela 7 – Taxa de aquecimento média do forno mufla para cada temperatura.

Temperatura alvo (°C)	Taxa de aquecimento média (°C/min)
200	9,36
400	8,57
600	5,88
800	5,43
1000	4,62

Fonte: Segalin (2018).

Para o resfriamento, seis corpos de prova foram retirados do forno mufla com o auxílio de pinça, luvas e todos os equipamentos de proteção necessários para o manuseio das amostras. No resfriamento natural, os corpos de prova foram postos sobre a bancada, dentro de uma bandeja metálica, onde permaneceram por um período de 24 horas, para que as amostras estivessem em equilíbrio com a temperatura ambiente. Já para o resfriamento brusco, submergiu-se as amostras em recipiente metálico contendo água corrente, durante um minuto, conforme Figura 23. A água corrente evitou o aquecimento da água; manteve-a a temperatura constante. Aferiu-se a temperatura da água, no início do ensaio, por meio de termômetro. Transcorrido um minuto, os corpos de provas foram postos sobre a bancada.

Figura 23 - Corpo de prova sendo submerso em água corrente para resfriamento brusco após exposição à 1000 °C.



Fonte: Autoria própria (2019).

Assim que retirados do recipiente metálico, aferiu-se a temperatura superficial das amostras com o auxílio de um termômetro digital infravermelho por dez segundos. Após esta primeira medição, o cronômetro continuou até um minuto para que fosse realizada a segunda conferência da temperatura. Realizou-se, ainda, uma terceira medição após dois minutos. Então, as amostras foram dispostas em bandeja metálica e deixadas sobre a bancada por 24 horas. Repetiu-se esse procedimento para cada corpo de prova de cada grupo do resfriamento brusco. A Figura 24 apresenta os corpos de prova do grupo G0 logo após ser retirado da mufla e os corpos de prova do grupo G10 logo após a etapa de resfriamento brusco.

Figura 24 - Corpos de prova no início do ensaio de resfriamento. Grupo G9 à esquerda e grupo G10 à direita.



Fonte: Autoria própria (2019).

### 3.2.4 Ensaio de resistência à compressão axial

Todas as amostras foram ensaiadas à compressão axial, no 29º dia, segundo permite a NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2018). O equipamento utilizado foi a Prensa de Compressão EMIC DL30000N, com capacidade de 300 kN – Figura 25 –, disponível no Laboratório de Materiais de Construção da UTFPR, Campus Toledo.

Figura 25 – Prensa de Compressão EMIC DL30000N.



Fonte: Autoria própria (2019).

A partir dos dados obtidos neste ensaio, calculou-se a resistência à compressão residual em termos de porcentagem e, então, analisou-se o efeito do modo de resfriamento nesta

propriedade em concretos reforçados com fibra de aço, após exposição à elevadas temperaturas. Além disso, foi feita uma comparação dos resultados obtidos com a literatura de referência.

### 3.2.5 Análise dos dados

Os resultados obtidos foram analisados para verificar a ocorrência de *Outliers* com o objetivo de conferir a existência de resultados discrepantes. Além disso, testes estatísticos como Análise de Variância de Fator Único, conhecido por ANOVA, e Teste de Tukey também foram utilizados.

A análise de *Outliers* se faz necessária para retirar observações individuais extremamente discrepantes. Dados como média, desvio padrão e amplitude são notadamente sensíveis à presença de *Outliers*. Neste trabalho, a análise de *Outliers* foi realizada por meio de um gráfico de resíduos gerado pelo software *Past*. Após a identificação do(s) dado(s) discrepante(s), este(s) foi(foram) retirado(s) e seguiu-se para a etapa seguinte do tratamento estatístico.

O teste de variância ANOVA tem por objetivo conferir se existe diferença significativa entre as médias e se há influência dos fatores em alguma variável dependente. Utiliza-se este teste estatístico para investigar se o tratamento considerado causa diferenças amostrais significativas ou se essas diferenças são causadas por outros fatores externos. Assim, este método foi utilizado para verificar a influência da temperatura na resistência à compressão para cada grupo de resfriamento separadamente.

Para isso, utiliza-se da hipótese nula ( $H_0$ ) a qual representa o caso em que as médias de cada grupo de temperatura de exposição são iguais. Então, compara-se a probabilidade de significância (valor-p) com o nível de significância definido ( $\alpha=5\%$ ). Logo, se o valor-p for maior que  $\alpha$ , então, confirma-se a hipótese nula e entende-se que a temperatura não exerce influência significativa na resistência à compressão. Caso ocorra o contrário, a hipótese nula é falsa e, conseqüentemente, conclui-se que a resistência à compressão é influenciada pelo aumento de temperatura.

Entretanto, a Análise de Variância de Fator Único não aponta qual ou quais são os tratamentos discrepantes, caso haja algum, isto é, não mostra qual ou quais temperaturas influenciam de forma significativa na resistência. Para tanto, esta verificação é feita com o Teste de Tukey.

O Teste de Tukey compara médias duas a duas, isto é, todos os pares de médias são comparados. Neste teste, calcula-se a diferença mínima significante, ou seja, a diferença mínima aceitável entre duas médias para que elas possam ser consideradas diferentes ao nível

de significância  $\alpha$ . Caso a diferença entre as médias seja maior que o valor de comparação, então, no caso deste trabalho, uma das temperaturas analisadas exerce maior influência na resistência do que a outra. Assim, tanto o teste ANOVA quanto o Teste de Tukey foram feitos com o auxílio do software *Past*.

### 3.2.6 Ensaio preliminares

Tendo em vista analisar se a metodologia estabelecida terá desempenho satisfatório, foram realizados ensaios preliminares. Foram moldados oito corpos de provas cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. O concreto seguiu o mesmo traço que o descrito anteriormente (1:1,53:2,12:0,48), e 1% de fibra de aço foi utilizado. As amostras seguiram o mesmo procedimento de moldagem e cura do item 3.2.2, além de terem sido mantidas na estufa a 105 °C por 24 horas.

Então, os corpos de prova foram colocados no forno mufla do Laboratório de Saneamento da UTFPR, Campus Toledo, sob taxa de aquecimento média de 4,62 °C/min, temperatura alvo de 1000 °C, e tempo de exposição de sete horas. Após essa etapa, as amostras foram resfriadas da mesma forma que o descrito no item 3.2.3, sendo quatro corpos de prova destinados ao resfriamento natural e quatro para o resfriamento brusco. A Figura 26 mostra os corpos de prova já em equilíbrio com a temperatura ambiente. O ensaio de compressão axial foi realizado na Máquina para Teste Universal WAW-1000D, com capacidade de 1000 kN, no Laboratório de Engenharia Civil da UNIPAR, Campus Toledo.

Figura 26 – Corpos de prova após serem resfriados naturalmente, à esquerda, e bruscamente, à direita.



Fonte: Autoria própria (2019).

A resistência de referência utilizada foi a encontrada por Segalin (2018), sendo de 57,75 MPa. A Tabela 8 apresenta a média dos resultados obtidos para a resistência à compressão em cada tipo de resfriamento. Verificam-se, na Figura 27, os resultados encontrados para a resistência à compressão residual. Nesta figura, é possível observar que as amostras submetidas ao resfriamento natural sofreram uma redução de 83,58%, ou seja, a resistência à compressão

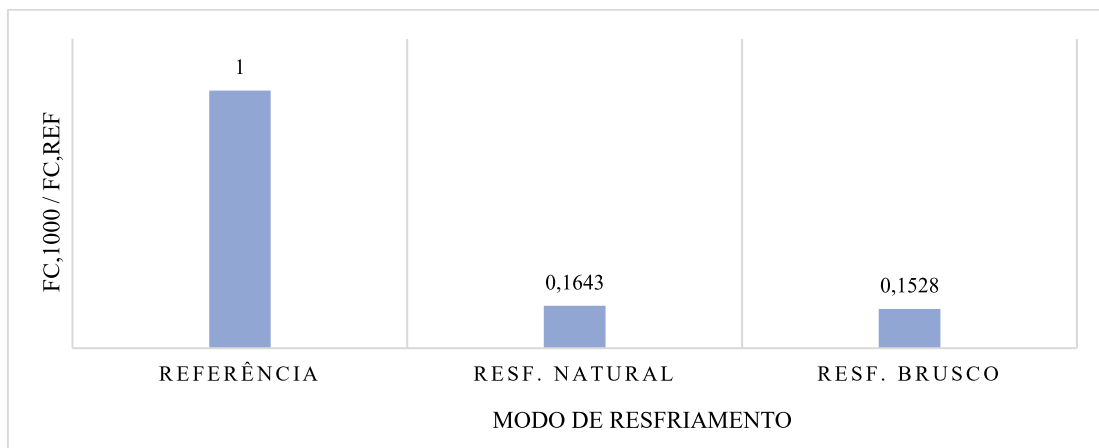
residual foi em torno de 16,43%. Já para o resfriamento brusco, obteve-se uma perda de 84,72% (15,28% de resistência residual).

Tabela 8 – Resistência à compressão do concreto sem e com fibra de aço após exposição a 1000 °C.

Temperatura	Resistência à compressão (MPa)	
	Resfriamento natural	Resfriamento brusco
23 ± 2 °C (concreto sem fibras) <sup>1</sup>	57,75 (sem aquecimento)	
1000 °C (concreto sem fibras) <sup>1</sup>	10,15	8,67
1000 °C (concreto com fibras de aço)	9,49	8,82

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 27 – Resistência à compressão relativa para cada modo de resfriamento após exposição a 1000 °C para CRFA.



Fonte: Autoria própria (2019).

A partir destes dados, é possível perceber que, no resfriamento natural, ao se comparar o desempenho do concreto com fibra de aço com o concreto sem fibras, obteve-se um melhor resultado (cerca de 6,50% maior) para o concreto sem fibras. Este comportamento não se repetiu no resfriamento brusco, no qual o concreto com fibra obteve uma resistência de 1,70% maior em relação ao concreto sem fibras.

Além disso, analisando apenas o CRFA, ao ser resfriado bruscamente, o impacto na resistência à compressão foi maior do que ao ser resfriado de forma natural – o que também ocorreu no concreto sem fibras. Possivelmente, esse fato ocorreu devido ao choque térmico ocasionado pela submersão das amostras diretamente em água, visto que os corpos de prova estavam a 1000 °C, e a água encontrava-se a temperatura ambiente.

Outro ponto importante é o fato de as fibras de aço terem mantido a integridade dos corpos de prova, em comparação ao concreto estudado por Segalin (2018). Os corpos de prova resfriados bruscamente após exposição à 1000 °C deste autor sofreram *spalling*, mesmo submetendo-os a estufa por 24 horas. Com isso, tem-se que os resultados obtidos estão dentro do esperado.

<sup>1</sup> Segalin (2018).



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, é importante salientar que foi necessário realizar uma correção no fator água/cimento no traço utilizado para a moldagem do concreto em decorrência do agregado graúdo ter apresentado quantidade significativa de material pulverulento na época da moldagem dos corpos de prova. Assim, o traço foi corrigido, logo utilizou-se um traço igual a 1:1,53:2,12:0,56 para a moldagem do concreto reforçado com fibra de aço.

### 4.1 GRADIENTES DE TEMPERATURA NO RESFRIAMENTO BRUSCO

A Tabela 9 apresenta a temperatura da água em cada dia de ensaio para o resfriamento brusco, na qual uma variação máxima de 1°C é observada.

Tabela 9 - Temperatura da água, em cada dia, para o ensaio de resfriamento brusco.

<b>Dia</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Temperatura de exposição (°C)</b>	200	400	600	800	1000
<b>Temperatura da água (°C)</b>	29,0	28,5	28,0	28,0	28,0

Fonte: Autoria própria (2020).

As medições de temperatura superficiais dos corpos de prova, após o resfriamento brusco (conforme apresentado no item 3.2.3), encontram-se na Tabela 10. Os valores de temperatura medidos logo após o resfriamento, ou seja, assim que retirados da água e postos sobre a bancada, estão indicados por  $t_1$ . Já  $t_2$  e  $t_3$  referem-se as medições realizadas após um e dois minutos do término do resfriamento, respectivamente.

Tabela 10 - Temperatura superficial de cada corpo de prova após resfriamento brusco.

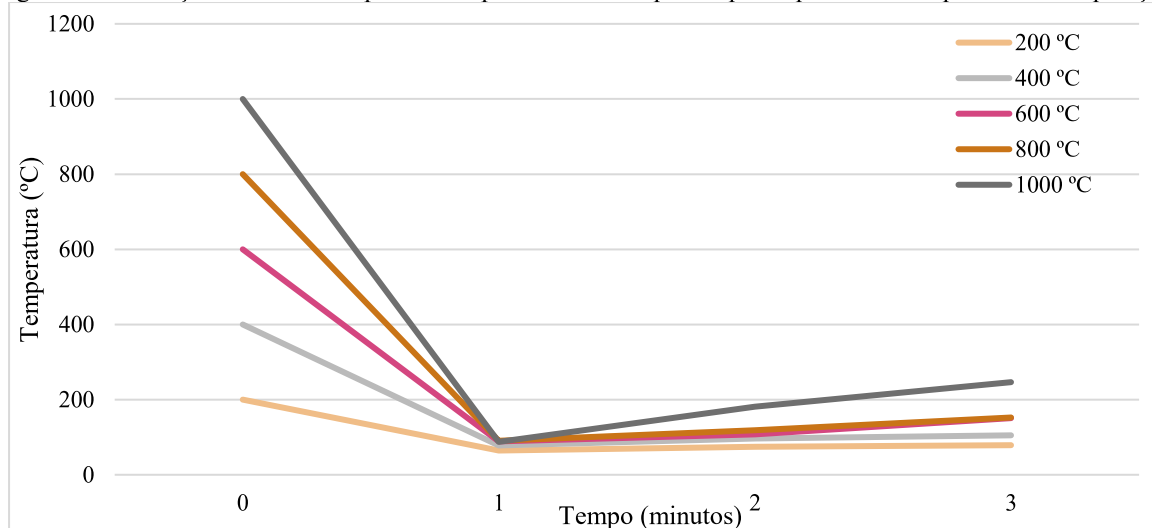
<b>Temperatura de exposição (°C)</b>	<b>Temperatura superficial</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>	<b>CP4</b>	<b>CP5</b>	<b>CP6</b>	<b>Média</b>
<b>200</b>	$t_1$ (°C)	62,4	62,8	64,0	67,4	63,2	67,7	<b>64,6</b>
	$t_2$ (°C)	73,0	75,0	76,2	78,4	71,0	71,8	<b>74,2</b>
	$t_3$ (°C)	76,7	79,1	82,8	81,5	77,2	76,4	<b>79,0</b>
<b>400</b>	$t_1$ (°C)	70,1	79,0	71,9	83,1	79,0	85,3	<b>78,1</b>
	$t_2$ (°C)	96,6	97,2	92,5	102,5	94,0	97,6	<b>96,7</b>
	$t_3$ (°C)	97,5	105,8	95,0	113,9	110,3	109,2	<b>105,3</b>
<b>600</b>	$t_1$ (°C)	90,1	87,1	90,2	80,6	93,9	91,3	<b>88,9</b>
	$t_2$ (°C)	93,5	100,8	104,6	98,3	133,3	116,8	<b>107,9</b>
	$t_3$ (°C)	113,7	151,2	144,5	153,4	181,4	160,1	<b>150,7</b>
<b>800</b>	$t_1$ (°C)	88,0	88,2	91,2	90,9	93,8	91,0	<b>90,5</b>
	$t_2$ (°C)	100,8	99,1	124,1	104,1	174,7	106,4	<b>118,2</b>
	$t_3$ (°C)	120,2	118,4	183,7	177,7	180,0	134,8	<b>152,5</b>

<b>1000</b>	$t_1$ (°C)	88,2	89,6	78,5	90,6	89,1	89,5	<b>87,6</b>
	$t_2$ (°C)	165,5	165,7	170,4	220,0	195,0	171,6	<b>181,4</b>
	$t_3$ (°C)	261,1	261,9	231,7	279,9	260,0	182,0	<b>246,1</b>

Fonte: Autoria própria (2020).

Assim, para melhor compreensão, elaborou-se o gráfico, conforme Figura 28, de temperatura superficial a partir das médias apresentadas na Tabela 10.

Figura 28 - Variação média da temperatura superficial dos corpos de prova para cada temperatura de exposição.



Fonte: Autoria própria (2020).

A partir desses resultados, é possível observar que a temperatura superficial, logo após o resfriamento brusco, diminui para valores menores que 100 °C, isto é, valores entre 64,6 °C e 90,5 °C – diferença de 25,9 °C –, independente da temperatura a que foram expostos os corpos de prova, caracterizando de fato um decréscimo brusco na temperatura. Já para os valores obtidos após 1 minuto do término do resfriamento, a variação aumentou significativamente; os resultados ficaram entre 74,2 °C e 181,4 °C, diferença de 107,2 °C. E, por último, após 2 minutos do fim do resfriamento, a diferença entre os resultados foi de 167,1 °C (valores entre 246,1 °C e 79,0 °C). A causa de tal feito se deve as diferentes temperaturas a que foram expostos os corpos de prova, de 200 °C a 1000 °C. Assim, mesmo com a temperatura da água utilizada para o resfriamento ter sido praticamente constante em todos os dias de ensaio, os corpos de provas expostos a 1000 °C mantêm-se, internamente, com sua temperatura mais elevada do que aqueles submetidos a 200 °C, o que faz com as amostras submetidas a uma maior temperatura de aquecimento, voltem a ter suas superfícies aquecidas de forma mais considerável.

Entretanto, mesmo com o aquecimento posterior dos corpos de prova, devido a temperatura interna, os gradientes de temperatura após o resfriamento são muito elevados, principalmente na temperatura de exposição de 1000 °C. A Tabela 11 apresenta esses gradientes para cada temperatura imediatamente após serem resfriados. Além disso, é importante frisar

que, apesar de ser o mesmo material – e, por consequência, mesma condutividade térmica – manteve-se constante o tempo para medição das temperaturas. Logo, as amostras submetidas as menores temperaturas de exposição podem ter atingido os valores presentes na Tabela 10 ( $t_1$ ) antes de um minuto.

Tabela 11 - Gradientes de temperatura imediatamente após resfriamento brusco.

<b>Temperatura de exposição (°C)</b>	<b>200</b>	<b>400</b>	<b>600</b>	<b>800</b>	<b>1000</b>
<b>Gradiente de temperatura (°C)</b>	135,4	321,9	511,1	709,5	912,4

Fonte: Aatoria própria (2020).

## 4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2018) no item 6.1 Cálculo da resistência define o cálculo da resistência à compressão por meio da divisão da força máxima alcançada (em newtons – N) pela área do corpo de prova (em mm). Porém, caso a relação altura-diâmetro (h/d) seja menor que 1,94, segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018), deve-se multiplicar a força por um fator de correção, conforme Tabela 12.

Tabela 12 - Fator de correção h/d.

<b>Relação h/d</b>	<b>2,00</b>	<b>1,75</b>	<b>1,50</b>	<b>1,25</b>	<b>1,00</b>
<b>Fator de correção</b>	1,00	0,98	0,96	0,93	0,86

Fonte: ABNT (2018).

Para valores intermediários de h/d, o fator de correção pode ser obtido por meio de interpolação linear. Desse modo, a Tabela 13 apresenta as alturas dos corpos de prova após serem retificados e a Tabela 14 apresenta as relações de h/d.

Tabela 13 - Altura dos corpos de prova.

<b>Altura (mm)</b>	<b>G0</b>	<b>G1</b>	<b>G2</b>	<b>G3</b>	<b>G4</b>	<b>G5</b>	<b>G6</b>	<b>G7</b>	<b>G8</b>	<b>G9</b>	<b>G10</b>
<b>CP1</b>	98,60	96,45	97,23	97,50	97,90	99,60	99,80	98,80	99,00	99,00	99,00
<b>CP2</b>	98,55	96,89	97,90	97,45	98,50	99,45	99,00	99,45	98,78	98,90	98,30
<b>CP3</b>	97,30	99,89	99,50	98,90	98,12	99,89	98,30	99,50	99,10	98,12	98,40
<b>CP4</b>	98,95	97,80	97,67	99,00	97,20	98,89	99,30	99,50	99,20	99,56	99,10
<b>CP5</b>	99,00	98,90	97,56	99,23	99,60	98,00	99,00	99,30	99,10	98,90	99,60
<b>CP6</b>	98,65	98,10	97,90	98,45	98,67	99,30	99,60	98,60	99,00	99,50	99,30

Fonte: Aatoria própria (2020).

Tabela 14 - Relação h/d para cada corpo de prova.

H/D	G0	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
CP1	1,97	<b>1,93</b>	1,94	1,95	1,96	1,99	2,00	1,98	1,98	1,98	1,98
CP2	1,97	1,94	1,96	1,95	1,97	1,99	1,98	1,99	1,98	1,98	1,97
CP3	1,95	2,00	1,99	1,98	1,96	2,00	1,97	1,99	1,98	1,96	1,97
CP4	1,98	1,96	1,95	1,98	1,94	1,98	1,99	1,99	1,98	1,99	1,98
CP5	1,98	1,98	1,95	1,98	1,99	1,96	1,98	1,99	1,98	1,98	1,99
CP6	1,97	1,96	1,96	1,97	1,97	1,99	1,99	1,97	1,98	1,99	1,99

Fonte: Autoria própria (2020).

A partir disso, tem-se que apenas um corpo de prova, G1CP1, apresentou relação h/d menor que 1,94. Desse modo, o fator de correção por interpolação para este caso é de 0,9944.

Os resultados obtidos para resistência à compressão de referência (grupo G0) são apresentados na Tabela 15. Nas Tabelas 16 e 17 encontram-se os resultados dos corpos de prova resfriados natural e bruscamente, respectivamente. Além disso, a Figura 29 apresenta, em forma de gráfico, os resultados médios de resistência à compressão residual do resfriamento natural, do resfriamento brusco e do grupo de referência, na qual é possível observar uma significativa redução na resistência para os grupos G7-G10 – temperaturas analisadas superiores a 800°C. Tal fato decorre da decomposição dos constituintes hidratados a base cálcio (C-S-H – Silicatos de Cálcio Hidratado) presentes na matriz cimentícia.

Tabela 15 - Resistência à compressão (MPa) do grupo de referência.

Grupo	Temp. exposição	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Média
G0	23 ± 2 °C	22,03	18,89	22,96	20,11	22,68	28,01	22,45

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 16 - Resistência à compressão (MPa) dos grupos referentes ao resfriamento natural.

Grupo	Temp. exposição (°C)	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Média
G1	200	23,88	19,78	21,83	22,93	23,26	20,81	22,08
G3	400	25,42	26,58	25,76	25,87	25,88	26,30	25,97
G5	600	14,06	16,37	16,55	17,87	15,56	17,32	16,29
G7	800	3,67	4,48	3,99	3,69	4,64	4,56	4,17
G9	1000	4,16	4,07	4,47	3,55	3,27	3,83	3,89

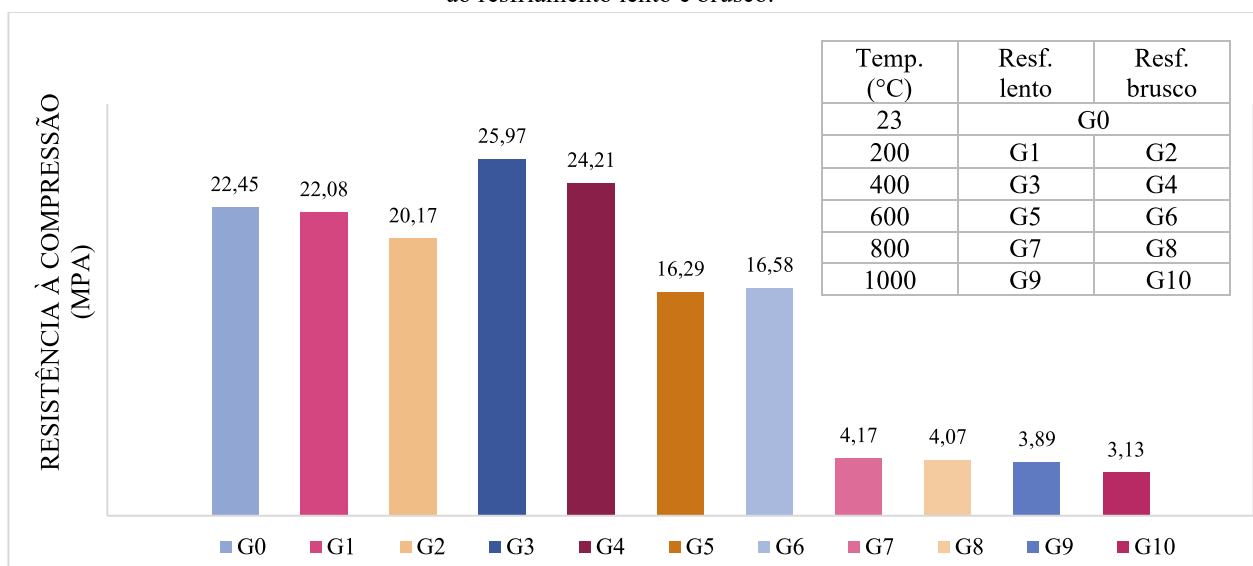
Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 17 - Resistência à compressão (MPa) dos grupos referentes ao resfriamento brusco.

Grupo	Temp. exposição (°C)	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Média
G2	200	20,44	18,87	19,42	18,97	21,42	21,91	20,17
G4	400	24,67	23,78	22,04	25,66	22,97	26,14	24,21
G6	600	17,43	17,96	17,33	17,49	14,88	14,40	16,58
G8	800	5,64	4,29	4,64	3,55	3,09	3,18	4,07
G10	1000	2,60	2,93	2,92	3,00	3,57	3,75	3,13

Fonte: Autoria própria (2020).

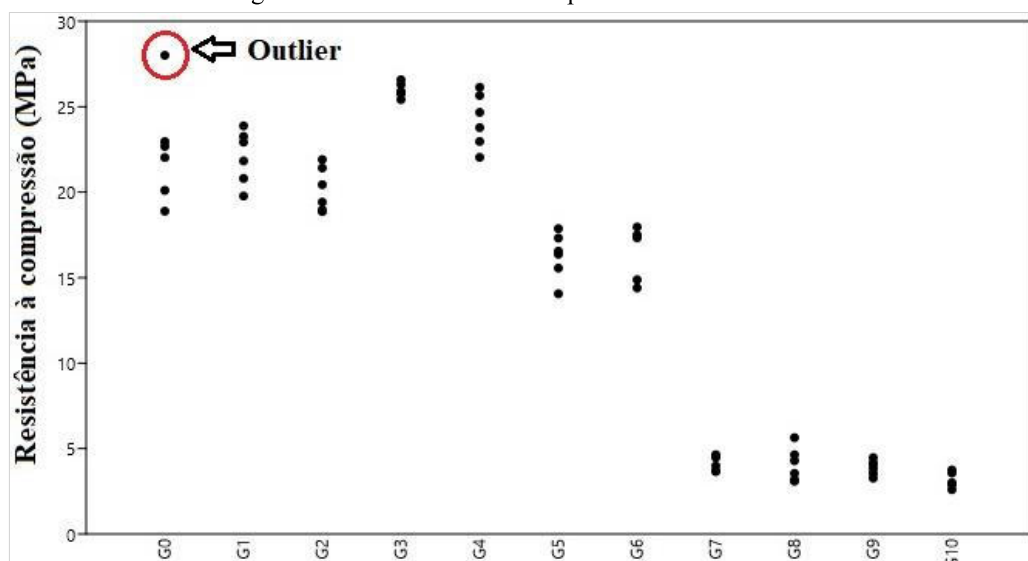
Figura 29 – Valores médios de resistência à compressão residual do grupo de referência e dos grupos submetidos ao resfriamento lento e brusco.



Fonte: Autoria própria (2020).

#### 4.2.1 Tratamento estatístico

A análise de *Outliers* foi feita por meio do gráfico de resíduos (Figura 30) gerado pelo software *Past* considerando todos os resultados. A partir disso, tem-se que no grupo de referência há apenas um resultado discrepante dos demais, o qual está identificado na Figura 29. Os outros grupos não apresentaram resultados discrepantes. Desse modo, esse dado (G0CP6) foi retirado e calculou-se a nova média para este grupo (Tabela 18).

Figura 30 - Gráfico de resíduos para análise de *Outliers*.

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 18 - Resistência à compressão (MPa) do grupo de referência após retirada de *Outlier*.

Grupo	Temp. exposição	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Média
G0	23 ± 2 °C	22,03	18,89	22,96	20,11	22,68	OUTLIER	21,33

Fonte: Autoria própria (2020).

O teste estatístico ANOVA foi aplicado aos resultados presentes nas Tabelas 16, 17 e 18 com o objetivo de analisar a influência do aquecimento na resistência à compressão. Primeiramente, considerou-se apenas os valores referentes à resistência de referência (Tabela 18) e aos grupos resfriados naturalmente (Tabela 16). Posteriormente, a mesma análise foi feita considerando a Tabela 18 e a Tabela 17 (resfriamento brusco).

Desse modo, a Tabela 19 apresenta os resultados referentes à primeira análise. Com isso, observa-se que  $F$  é maior que  $F$  crítico e que o valor- $p$  é menor que o nível de significância de 5%, logo, rejeita-se a hipótese nula, ou seja, a temperatura exerce influência na resistência à compressão. Além disso, a soma dos quadrados (SQ) entre grupos corresponde à 98,65% do total, isto é, a temperatura explica quase que a totalidade dos resultados obtidos.

Tabela 19 - ANOVA para resistências à compressão residuais do resfriamento natural.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2669,782	5	533,956	422,601	3,73E-26	2,545
Dentro dos grupos	36,642	29	1,264			
Total	2706,424	34				

Fonte: Autoria própria (2020).

Já para a análise dos grupos resfriados bruscamente, os resultados encontram-se na Tabela 19. Novamente rejeita-se a hipótese nula, pois  $F$  é maior que  $F$  crítico e o valor- $p$  é menor que o nível de significância, comprovando a influência da temperatura na resistência à compressão do concreto reforçado com fibra de aço. E, ainda, a soma dos quadrados entre grupos representa 97,97% do total; 97,97% dos resultados obtidos são explicados pela temperatura e 2,03% por outros fatores.

Tabela 20 - ANOVA para resistências à compressão residuais do resfriamento brusco.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2445,574	5	489,115	279,671	1,33E-23	2,545
Dentro dos grupos	50,718	29	1,749			
Total	2496,292	34				

Fonte: Autoria própria (2020).

Entretanto, a ANOVA apenas indica que a temperatura influencia na resistência à compressão, sem indicar qual ou quais são as temperaturas. Assim, realizou-se o Teste de Tukey, por meio do software Past. A primeira análise considerou a resistência de referência e os grupos de resfriamento lento e, posteriormente, a resistência de referência juntamente aos grupos de resfriamento brusco. A Tabela 21 apresenta o resultado referente à primeira análise.

Tabela 21 - Teste de Tukey para o grupo de referência G0 e para os grupos referentes ao resfriamento lento.

	G0	G1	G3	G5	G7	G9
G0		0,878	2,508E-06	5,142E-07	3,553E-15	3,553E-15
G1	1,553		2,268E-05	1,172E-08	3,553E-15	3,553E-15
G3	9,629	8,47		6,151E-14	3,553E-15	3,553E-15
G5	10,48	12,62	21,09		3,775E-15	3,664E-15
G7	35,66	39,03	47,5	25,5		0,9979
G9	36,24	39,64	48,11	27,01	0,6102	

Fonte: Autoria própria (2020).

As células destacadas em laranja referem-se aos grupos cujas temperaturas exerceram maior influência na resistência à compressão. Por exemplo, o grupo G3 (temperatura de exposição de 400 °C) exerceu maior influência que o grupo G0 (referência) e que o grupo G1 (temperatura de exposição de 200 °C). Logo, temperaturas a partir de 400 °C até 1000 °C exerceram grande influência na resistência à compressão.

A Tabela 22 refere-se ao resultado do Teste de Tukey para os grupos de referência e do resfriamento brusco. Com isso, também se percebe que o aumento de temperatura, a partir dos 400 °C até 1000 °C reduz significativamente a resistência à compressão. É interessante notar,

ainda, que para os dois modos de resfriamento, o Teste de Tukey apresentou os mesmos resultados. Isto é, independentemente do tipo de resfriamento a que os corpos de prova foram submetidos, as temperaturas de maior influência são as mesmas, na propriedade mecânica analisada.

Tabela 22 - Teste de Tukey para o grupo de referência G0 e para os grupos referentes ao resfriamento brusco.

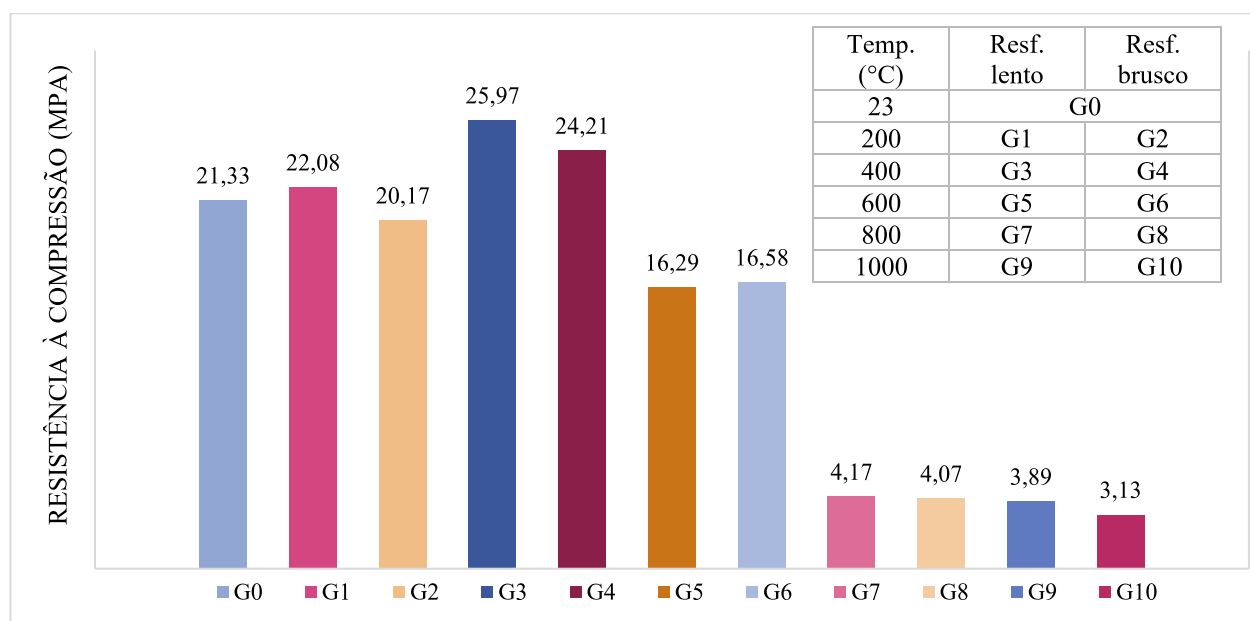
	G0	G2	G4	G6	G8	G10
G0		0,6963	0,01377	2,629E-05	3,553E-15	3,553E-15
G2	2,053		0,0001528	0,0007547	3,553E-15	3,553E-15
G4	5,079	7,48		9,784E-10	3,553E-15	3,553E-15
G6	8,393	6,649	14,13		8,66E-15	4,33E-15
G8	30,5	29,83	37,31	23,18		0,8203
G10	32,15	31,57	39,05	24,92	1,735	

Fonte: Autoria própria (2020).

#### 4.2.2 Discussão dos resultados

A partir do tratamento estatístico é possível, então, realizar uma análise mais detalhada dos resultados obtidos. Após a retirada do dado discrepante na etapa de verificação de *Outliers*, calculou-se uma nova média para o grupo de referência, conforme já apresentado na Tabela 18. Desse modo, a Figura 31 apresenta um novo gráfico com as médias de todos os grupos e na Figura 32 estão presentes as resistências à compressão residual em termos de porcentagem.

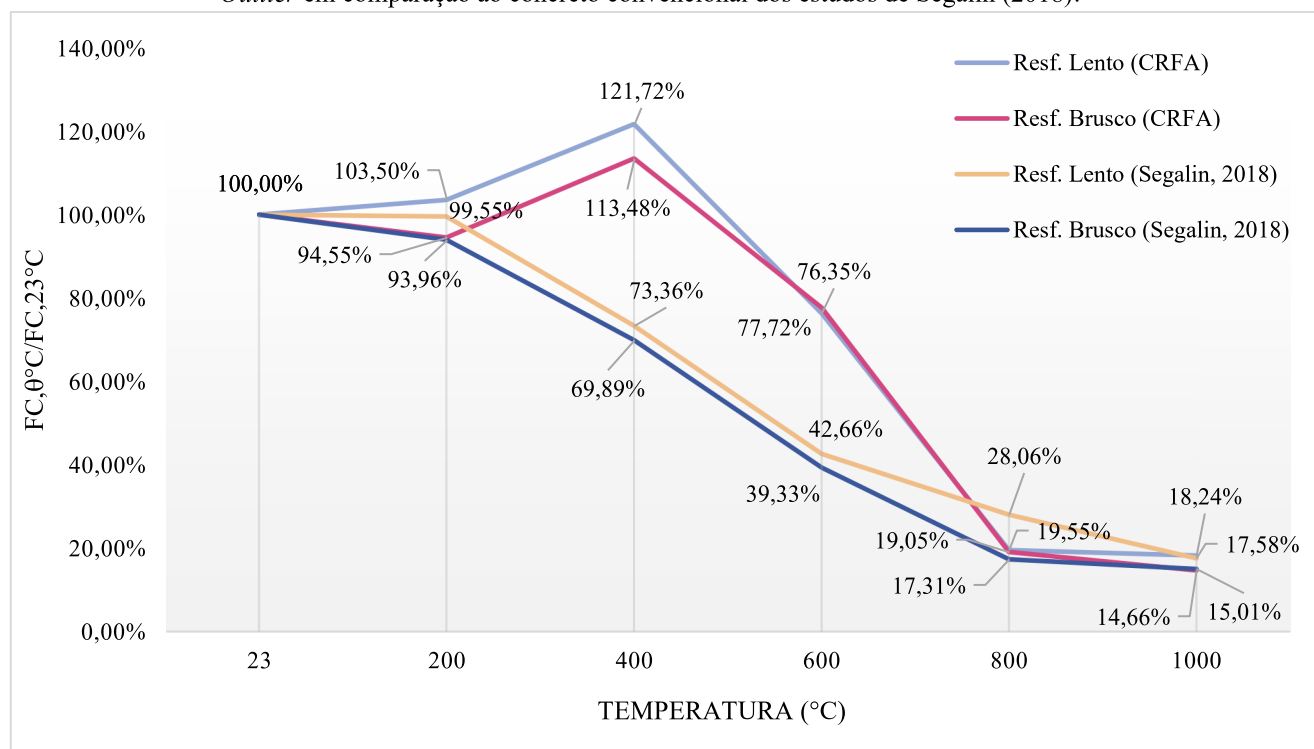
Figura 31 - Resistência à compressão média, em MPa, para todos os grupos de estudo, após retirada de *Outlier*.



Fonte: Autoria própria (2020).



Figura 32 - Resistência à compressão média, em porcentagem, do concreto com fibra de aço, após retirada de *Outlier* em comparação ao concreto convencional dos estudos de Segalin (2018).



Fonte: Autoria própria (2020).

A partir da Figura 31 pode-se notar que para a temperatura de 200 °C, no resfriamento lento (grupo G1) em comparação ao grupo de referência (grupo G0) a diferença entre as resistências à compressão média foi quase nula (0,75 MPa). Já o resfriamento brusco, nesta mesma temperatura, causou um maior dano a esta propriedade, com uma redução de 1,16 MPa. Essa maior redução era esperada pois, ao submeter o concreto a um resfriamento brusco, há a ocorrência de choque térmico em decorrência da diferença de temperatura entre a superfície do corpo de prova e a água. Este resultado está em acordo ao estudo de Botte e Caspele (2017), no qual os corpos de provas resfriados por imersão em água sofreram uma redução na resistência à compressão da ordem de 35%, em contrapartida, a redução naqueles resfriados por pulverização foi da ordem de apenas 15% para a temperatura de 175 °C.

Outro ponto importante é o fato de que para a temperatura de exposição de 400 °C, houve um aumento na resistência à compressão nos dois modos de resfriamento, em contraste ao concreto convencional dos estudos apresentados na revisão bibliográfica. Este fato corrobora com os estudos de Li et al. (2019a) e Serrano et al. (2016). Os autores ressaltam que entre as temperaturas 200 °C e 400 °C ocorre a desidratação do silicato de cálcio hidratado de modo que os agregados se expandem, logo, estes se aproximam das fibras, o que pode levar a um aumento na resistência. Além disso, o comportamento das curvas referentes ao CRFA é semelhante às curvas presentes na Figura 7 (item 2.1) referente ao ensaio de cisalhamento feito por Moghadam e Izadifard (2019).

Além disso, nota-se na Figura 31 que entre as resistências dos grupos com temperatura de exposição de 600 °C e 800 °C, praticamente não há diferença (1,37% para a temperatura de 600 °C e 0,50% para 800 °C), ou seja, o modo de resfriamento não interferiu de modo significativo na resistência à compressão residual nestas temperaturas. Em comparação ao estudo realizado por Segalin (2018), nas temperaturas de exposição de 600 °C e 800 °C, as diferenças entre as resistências à compressão nos dois modos de resfriamento do concreto convencional foram de 3,33% e 10,76%, respectivamente. Assim, a adição de fibras de aço foi capaz de diminuir a influência do modo de resfriamento na propriedade mecânica analisada.

Por meio das Figuras 31 e 32 é possível perceber a maior influência, na resistência à compressão, das temperaturas acima de 400 °C, conforme apontou o Teste de Tukey. Na temperatura de exposição de 600 °C, a resistência à compressão residual foi de 76,35% e 77,72% para os resfriamentos lento e brusco, respectivamente. Esta maior redução, para os dois modos de resfriamento, em comparação a temperaturas de exposição menores, ocorreu devido à degradação do hidróxido de cálcio, conforme apresentado no item 2.1.

Em relação ao concreto convencional, o estudo produzido por Segalin (2018) apresentou, na temperatura de 600 °C, resistência à compressão residual de 42,66% e 39,33% para o modo de resfriamento lento e brusco, respectivamente. Já o estudo conduzido por Botte e Caspeepele (2017), apresentou uma resistência à compressão residual de 20% para o concreto convencional resfriado por meio de imersão em água, conforme apresentado no item 2.1. Com isso, tem-se que a adição de fibras de aço contribuiu de forma positiva no desempenho do concreto, permitindo que o mesmo, até 600°C, tenha apresentado uma perda de resistência da ordem de apenas 25%, ao passo que em concretos não reforçados com fibras esta redução chegou a valores da ordem de 60%. Caetano et al. (2019) obtiveram resultados similares, conforme apresentado no item 2.2. Nesse estudo as fibras de aço foram capazes de controlar a redução na resistência à compressão do concreto em comparação ao concreto sem fibras.

Na temperatura de exposição de 800 °C ocorreu uma redução acentuada na resistência à compressão. Para o resfriamento lento a resistência residual foi de 19,55% e para o resfriamento brusco foi de 19,05%. Essa maior redução era esperada pois, a 800 °C ocorre a completa degradação do C-S-H, um dos principais constituintes do concreto. Já em comparação ao concreto convencional, Segalin (2018) obteve um resultado de 28,06% para o resfriamento lento e 17,31% para o resfriamento brusco. Poon et al. (2001) obteve uma redução na resistência à compressão do concreto convencional, resfriado lentamente, em 90%. Logo, apesar de diminuir a influência do modo de resfriamento, as fibras não foram capazes de controlar a redução na resistência à compressão uma vez que a 800 °C a matriz cimentícia já está deteriorada.

Já ao elevar a temperatura a 1000 °C e submeter as amostras ao resfriamento lento, a resistência à compressão residual foi de 18,24%. Já para o resfriamento brusco, o resultado foi de 14,66%. Apesar da adaptação ao traço, estes resultados são semelhantes aos resultados obtidos nos ensaios preliminares (16,43% para o resfriamento lento e 15,28% para o resfriamento brusco). Quanto ao concreto convencional, os resultados obtidos por Segalin (2018) foram de 17,58% para o resfriamento lento e 15,01% para o resfriamento brusco. Logo, ao submeter o concreto a temperatura de 1000 °C as fibras não são mais capazes de influenciar significativamente na resistência à compressão do concreto. E, ainda, ao comparar os resultados com temperatura de exposição de 1000 °C com os resultados com temperatura de exposição de 800 °C tem-se uma diferença de 1,31% para o resfriamento lento e 4,39% para o resfriamento brusco. Logo, conforme apontou o Teste de Tukey, ao elevar a temperatura de 800 °C para 1000 °C não há diferença significativa entre as resistências à compressão residuais pois, como já apresentado, a 800 °C a matriz cimentícia encontra-se num considerável estado de degradação.

Acerca do *spalling*, observou-se em nenhum corpo de prova este fenômeno, logo, a fase de pré-aquecimento garantiu a evaporação da água livre presente no concreto de forma lenta. Contudo, nas temperaturas de 600 °C e 800 °C, os corpos de prova resfriados bruscamente apresentaram uma significativa degradação devido ao lascamento superficial após contato com a água. Já as amostras expostas a maior temperatura alvo (1000 °C), tanto aquelas resfriadas de forma natural quanto aquelas resfriadas de forma brusca, não sofreram intensa degradação. Visualmente, ocorreu apenas mudança na coloração do concreto, com este passando de cinza claro, antes do aquecimento, para marrom claro, após o aquecimento. A Figura 33 apresenta todos os corpos de prova após o ensaio de resfriamento.

Figura 33 - Concreto reforçado com fibra de aço após ensaio de resfriamento. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8, G9 e G10.







Fonte: Autoria própria (2020).

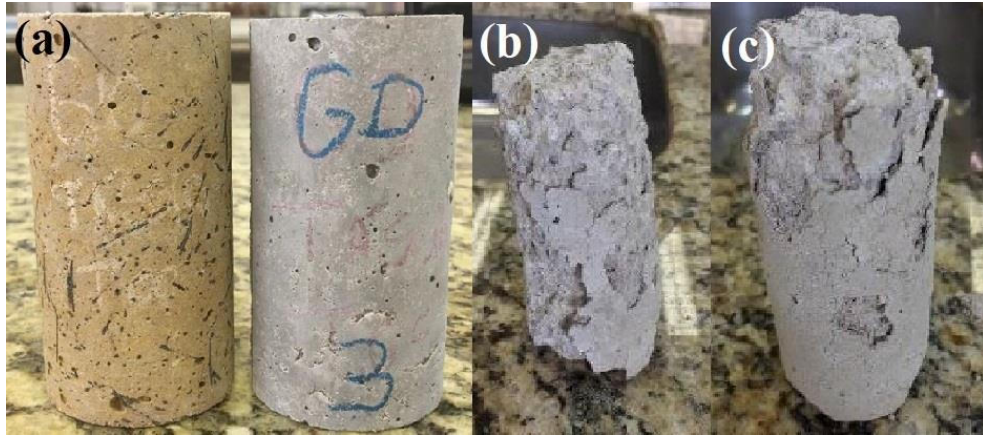
Ao comparar o concreto reforçado com fibra de aço com o concreto convencional do estudo do Segalin (2018), é possível perceber que as fibras foram capazes de manter a integridade do concreto de forma satisfatória, principalmente na temperatura de exposição de 1000 °C, conforme Figuras 34 e 35.

Figura 34 - (a) CRFA após exposição a 800 °C e resfriado bruscamente ao lado de CRFA não submetido ao aquecimento; (b) concreto convencional após resfriamento brusco e exposição a 800 °C.



Fonte: (a) Autoria própria (2020); (b) Segalin (2018).

Figura 35 - (a) CRFA após resfriamento brusco e exposição a 1000 °C ao lado de CRFA não submetido ao aquecimento; (b) e (c) concreto convencional após resfriamento brusco e exposição a 1000 °C



Fonte: (a) Autoria própria (2020); (b) e (c) Segalin (2018).

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise do modo de resfriamento (lento ou brusco) no concreto reforçado com fibra de aço após exposição a elevadas temperaturas (200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C e 1000 °C). Assim, as principais conclusões são:

- No modo de resfriamento lento, ao comparar o CRFA com o concreto convencional, a resistência à compressão residual do CRFA foi maior, exceto na temperatura de exposição de 800 °C e a 1000 °C, na qual os valores foram muito similares;
- No modo de resfriamento brusco, o desempenho do CRFA foi melhor em comparação a um concreto convencional exceto na temperatura de 1000 °C na qual os resultados foram similares em função do elevado grau de decomposição dos produtos de hidratação do cimento. Neste ponto, observou-se que até a temperatura de 600°C a redução de resistência do concreto com fibras foi da ordem de 25%, ao passo que no concreto convencional a redução foi da ordem de 60%;
- A partir de 400 °C foi observado uma maior influência do aumento de temperatura na resistência à compressão residual. Contudo, ao elevar a temperatura para 800 °C e, posteriormente, para 1000 °C, não houve interferência significativa nessa propriedade devido a degradação do concreto;
- Ao expor o concreto reforçado com fibra de aço a temperatura de 400 °C, ocorreu um aumento na resistência à compressão residual para os dois modos de resfriamento (aumento de 21,71% ao resfriar o CRFA naturalmente e 13,40% ao resfriá-lo bruscamente) em decorrência, possivelmente, da desidratação do silicato de cálcio hidratado o que leva a expansão dos agregados e conseqüente aproximação da fibras, de forma a elevar a resistência;
- Ao comparar os modos de resfriamento, para as temperaturas de 600 °C e 800 °C, os resultados obtidos de resistência à compressão residual do CRFA foram muito semelhantes, logo, esta propriedade não sofreu influência significativa do modo de resfriamento nessas temperaturas;
- Em relação ao *spalling*, em nenhum corpo de prova se observou esse fenômeno. Logo, ao submeter as amostras a um aquecimento na estufa, a 100 °C, ocorreu a evaporação de forma lenta da água livre no concreto. Assim, independentemente da temperatura de

aquecimento posterior, não ocorreu o lascamento superficial das amostras devido a esse caso;

- Tratando sobre o estado de degradação ao final de cada ensaio, até 400 °C, a integridade de todas as amostras foi mantida. Já para as temperaturas de 600 °C e 800 °C, as amostras resfriadas de forma brusca, em decorrência do choque térmico ocasionado pela submersão em água corrente, ocorreu fragmentação superficial. E, ao expor o concreto reforçado com fibra de aço a temperatura de 1000 °C, nenhum corpo de prova sofreu grandes danos, ocorrendo apenas mudança na coloração;
- E, por fim, ao comparar o estado de degradação do concreto reforçado com fibra de aço com um concreto convencional nota-se que as fibras foram capazes de manter a estrutura dos corpos de prova de forma mais eficiente, de modo que foi possível preservar a integridade das amostras.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em virtude da necessidade de maiores pesquisas quanto ao comportamento do concreto reforçado com fibra de aço, sugere-se:

- Comparar os diferentes tipos de fibras existentes no mercado, bem como diferentes quantidades;
- Investigar os efeitos dos diferentes tipos de agregados com as fibras de aço e outras;
- Investigar a influência do aumento de temperatura e do modo de resfriamento em outras propriedades mecânicas do concreto;
- Variar o tempo de exposição do concreto a elevadas temperaturas.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821**: Preparação de concreto em laboratório - Procedimento. Rio de Janeiro, 2009c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15530**: Fibras de aço para concreto - Especificações. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- BATISTA, L. **Joelma e Andraus: fogo e tragédia em SP**. O Estado de S. Paulo, 2018. Disponível em: <<https://acervo.estadao.com.br/noticias/acervo,joelma-e-andraus-fogo-e-tragedia-em-sp,70002290695,0.htm>>. Acesso em: 13 Agosto 2019.
- BOTTE, W.; CASPEELE, R. Post-cooling properties of concrete exposed to fire. **Fire Safety Journal**, v. 92, p. 142-150, Setembro 2017.
- CAETANO, H.; FERREIRA, G.; RODRIGUES, J. P. C.; PIMIENTA, P. Effect of the high temperatures on the microstructure and compressive strength of high strength fibre concretes. **Construction and Building Materials**, v. 199, p. 717-736, Fevereiro 2019.
- CAETANO, H.; RODRIGUES, J. P. C.; PIMIENTA, P. Flexural strength at high temperatures of a high strength steel and polypropylene fibre concrete. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116721-116734, Dezembro 2019.
- FIGUEIREDO, A. D. de. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 248 p. Tese (Livro-Docência) - Escola Politécnica de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

- JOHNSTON, C. D. **Fiber-reinforced cements and concretes**. New York: Taylor & Francis, v. 3, 2010.
- LASCARRO, M. Indicadores do concreto. **Construção Latino Americana**, 2017. Disponível em: <<https://www.construcaolatinoamericana.com/indicadores-do-concreto/128426.article>>. Acesso em: 2 Março 2020.
- LI, L.; ZHANG, R.; JIN, L.; DU, X.; WU, J.; DUAN, W. Experimental study on dynamic compressive behavior of steel fiber reinforced concrete at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 210, p. 673-684, Junho 2019a.
- LI, Y.; PIMIENTA, P.; PINOTEAU, N.; TAN, K. H. Effect of aggregate size and inclusion of polypropylene and steel fibers on explosive spalling and pore pressure in ultra-high-performance concrete (UHPC) at elevated temperature. **Cement and Concrete Composites**, v. 99, p. 62-71, Maio 2019b.
- LIANG, X.; WU, C.; SU, Y.; CHEN, Z.; LI, Z. Development of ultra-high performance concrete with high fire resistance. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 400-412, Agosto 2018.
- MOGHADAM, M. A.; IZADIFARD, R. Evaluation of shear strength of plain and steel fibrous concrete at high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 215, p. 207-216, Agosto 2019.
- MURARO, C. **Edifício Wilton Paes de Almeida: prédio que desabou em SP foi projetado na década de 1960 e era patrimônio histórico**. G1, 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/edificio-wilton-paes-de-almeida-predio-que-desabou-em-sp-foi-projetado-na-decada-de-1960-e-era-patrimonio-historico.ghtml>>. Acesso em: 13 Agosto 2019.
- PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto e construções**, São Paulo, n. 53, p. 80, Janeiro. Fevereiro. Março. 2009.
- POON, C.-S.; AZHAR, S.; ANSON, M.; WONG, Y-L. Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1291-1300, 2001.
- SEGALIN, L. Z. **Influência do modo de resfriamento na resistência à compressão do concreto após exposição a elevadas temperaturas**. 98 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2018.
- SERAFINI, R.; DANTAS, S. R. A.; SALVADOR, R. P.; AGRA, R. R.; RAMBO, D. A. S.; BERTO, A. F.; FIGUEIREDO, A. D. de. Influence of fire on temperature gradient and physical-mechanical properties of macro-synthetic fiber reinforced concrete for tunnel linings. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 254-268, Julho 2019.
- SERRANO, R.; COBO, A.; PRIETO, M. I.; GONZÁLEZ, M. N. Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 302-309, Setembro 2016.